

**DETERMINACIÓN DE RELACIONES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA  
EL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO (TRAMO SALVAJINA – LA VIRGINIA)**

**LUIS ALBERTO CORTES ARANGO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA  
2016**

**DETERMINACIÓN DE RELACIONES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA  
EL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO (TRAMO SALVAJINA – LA VIRGINIA)**

**LUIS ALBERTO CORTES ARANGO**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial  
Para optar al título de Ingeniero Civil

**Directores**

**José Luis García Vélez. MSc.**

**Carlos Ramírez Callejas. MSc**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA  
2016**

## RESUMEN

Los ríos aluviales son sistemas altamente dinámicos y complejos donde interactúan numerosas variables, tales como el régimen de caudales, las características geomorfológicas del cauce y su cuenca, el transporte de sedimentos y la pendiente del cauce. La interacción de estas variables determina la morfología de los ríos, la cual puede ser alterada debido a cambios inducidos natural o artificialmente (por interacción antrópica) en alguna de estas variables.

En el presente estudio se realizó la caracterización del río Cauca con base en la información existente de los estudios previos, realizados en el Valle Alto del río Cauca, como lo son el Proyecto de Modelación del río Cauca (PMC) y el informe de curvas de calibración, ambos realizados por el grupo de investigación en hidráulica fluvial y marítima- HIDROMAR. Para la obtención de las ecuaciones de geometría hidráulica en estación, se utilizó la información otorgada por la Corporación Autónoma del Valle del Cauca (CVC), correspondiente a los aforos realizados en las estaciones hidrométricas sobre la corriente del río Cauca (Suárez, La Balsa, Tablanca, La Bolsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria y Anacaro); para las cuales se realizó el cálculo de las ecuaciones de tipo potencial para los parámetros hidráulicos, geométricos y sedimentológicos (ancho, velocidad media, profundidad hidráulica, área mojada, radio hidráulico, perímetro mojado, número de Froude, nivel de agua, factor de forma y sólidos en suspensión), en función del caudal, para los cuales se realizó el análisis comparativo de los exponentes obtenidos para los valores temporales denominados Pre-Salvajina, Post-Salvajina y General; el primero comprendido entre el año de inicio de operación de cada estación hidrométrica y el año de 1984, el segundo desde 1984 hasta la última fecha de registro disponible para cada estación, el período General se refiere a todos los datos de aforos disponibles por cada estación.

Se desarrolló el análisis de los cocientes obtenidos para los exponentes de velocidad, ancho y profundidad hidráulica, a fin de poderlos correlacionar con las formas de las secciones transversales de las estaciones hidrométricas.

Se obtuvieron relaciones de geometría hidráulica a partir de los caudales característicos definidos para cada estación hidrométrica y también en función del área de drenaje aferente a cada estación. Por último se realizó el análisis de las condiciones hidráulicas y geométricas hacia aguas abajo, teniendo en cuenta dos frecuencias de descarga (20%, 80%).

En general las relaciones de geometría hidráulica locales y regionales obtenidas se consideran bastante aceptables, por lo cual se pueden utilizar en diferentes estudios y proyectos relacionados con el manejo, aprovechamiento y conservación del río Cauca en su valle alto.

**Palabras claves:** Geometría hidráulica, río Cauca, caudal a banca llena, geometría hidráulica en estación y hacia aguas abajo, variaciones aguas abajo.

## ABSTRACT

In the present study the characterization of the Cauca River is performed on the basis of existing information from previous studies conducted in the high Valle del Cauca River, such as the modeling project of the river Cauca (PMC) and the report of curves calibration, both conducted by the research group Hidromar river hydraulics and coastal access. The information provided by the Autonomous Corporation of Valle del Cauca (CVC), corresponding to the appraisals made in the hydrometric stations on the current of the river Cauca (Suarez, La Balsa was used to obtain the equations of geometry hydraulic station, Tablanca, La Bolsa, Anthill, Juanchito Mediacanoa, Guayabal, La Victoria and AnaCaro); For which the calculation equations for hydraulic potential, geometrical and sedimentological parameters (width, average speed, hydraulic depth, wetted area, hydraulic radius, wetted perimeter, Froude number, water level, type form factor was made and suspended solids), depending on the flow rate, for which the comparative analysis of the exponents obtained for the so-called Pre -Salvajina time values, and General Post-Salvajina was made; the first year between the start of operation of each gauging station and the year 1984, the second from 1984 to the last date of record available for each season, the period General to all data available refers gauging per station .

Analysis of the ratios obtained for the exponents of speed, width and depth hydraulic developed, so they can be correlated with the shapes of the cross section of hydrometric stations.

Hydraulic geometry relations obtained from the characteristic flows defined for each gauging station and also based on the area of each station drainage afferent. Finally hydraulic analysis and geometric conditions downstream was performed, considering two frequencies discharge (20%, 80%).

In general relations obtained local and regional hydraulic geometry is considered quite acceptable, which can be used in different studies and projects related to the management, use and conservation of the Cauca River in its upper valley.

### ***Keywords:***

*Hydraulic geometry, Cauca River, a bench full flow, hydraulic geometry and downstream station, downstream variations.*

**Nota de Aceptación:**

---

---

---

---

---

**Firma Jurado**

---

**Firma Jurado**

---

**Firma Jurado**

## **AGRADECIMIENTOS**

*La vida siempre te colocará obstáculos en el camino  
Pero con ayuda de Dios todo es posible y por eso le doy gracias por permitirme cerrar este  
ciclo en mi vida,  
A mi madre y familia por el apoyo permanente, por ser mi motivación para luchar día a día,  
A mis profesores en especial a José Luis García y a Carlos Alberto Ramírez en la realización  
de este proyecto, gracias por su orientación y confianza durante la elaboración de este.  
Y a todas aquellas personas que de uno u otra manera contribuyeron a que yo pudiera realizar  
satisfactoriamente este proyecto.*

## TABLA DE CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN .....	11
1. MARCO TEÓRICO.....	12
1.1 CONSIDERACIONES GENERALES .....	12
1.2 INTERRELACIONES ENTRE EL CAUDAL Y LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS .....	13
1.3 VARIACIÓN AGUAS ABAJO DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL CAUCE.....	15
2. ANTECEDENTES .....	29
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	30
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	30
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	30
4. JUSTIFICACIÓN .....	31
5. OBJETIVOS .....	32
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	32
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	32
6. METODOLOGÍA .....	33
6.1 TIPO DE ESTUDIO: .....	33
6.2 FASE 1: CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA, HIDROLÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL RÍO CAUCA .....	33
6.3 FASE 2: DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA EN ESTACIÓN. ....	33
6.4 FASE 3: DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES REGIONALES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA EL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO. ....	33
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
7.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	35
7.2 TRAMO DE ANÁLISIS (SALVAJINA – LA VIRGINIA).....	36
7.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CLIMA DE LA ZONA.....	36
7.2.2 PRECIPITACIÓN.....	37
7.2.3 HIDROLOGÍA .....	37
7.2.4 ASPECTOS AMBIENTALES .....	38
7.2.5 CONTAMINACIÓN DEL RÍO CAUCA.....	38
7.2.6 EXPLOTACIÓN DE LOS MATERIALES DEL LECHO DEL RÍO CAUCA.....	39

7.3 MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	39
7.4 GEOMETRÍA HIDRÁULICA EN LAS ESTACIONES EXISTENTES EN EL RÍO CAUCA .....	42
7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS RELACIONES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA OBTENIDAS EN LAS ESTACIONES SOBRE EL RÍO CAUCA PARA LOS PERÍODOS PRE- SALVAJINA Y POST-SALVAJINA.....	68
7.6 ANÁLISIS DE LOS COCIENTES ENTRE LOS EXPONENTES DEL ANCHO, PROFUNDIDAD Y VELOCIDAD DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS SOBRE EL RÍO CAUCA PARA EL PERÍODO POST-SALVAJINA.....	72
7.7 GEOMETRÍA HIDRÁULICA AGUAS ABAJO.....	74
7.7.1 CAUDALES CARACTERÍSTICOS:.....	74
7.7.2 CAUDAL DOMINANTE:.....	75
7.7.3 CAUDAL A BANCA LLENA.....	76
7.7.4 CAUDAL MEDIO.....	79
7.7.5 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES REGIONALES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA EL PERÍODO POST-SALVAJINA.....	80
7.7.6 VARIACIÓN DE LAS RELACIONES REGIONALES DE GEOMETRÍA HIDRAULICA PARA EL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO EN EL PERÍODO POST- SALVAJINA.....	85
8. CONCLUSIONES .....	92
9. RECOMENDACIONES .....	96
10. BIBLIOGRAFÍA .....	97



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Valores de exponentes y coeficientes de ajuste para variación en estación de las ecuaciones de geometría hidráulica caudal –ancho, profundidad hidráulica y velocidad en diferentes cauces fluviales.	15
<b>Tabla 2.</b> Valores de exponentes y coeficientes de ajuste para variación en estación de las ecuaciones de geometría hidráulica caudal –ancho, profundidad hidráulica y velocidad en diferentes cauces fluviales.	17
<b>Tabla 3.</b> Ecuaciones multiparamétricas obtenidas con el caudal de creciente de 2 años y a banca llena para el ancho y la profundidad hidráulica, en la variación aguas abajo en diferentes cauces aluviales.	18
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes y exponentes de ajuste de las ecuaciones de geometría hidráulica caudal- perímetro mojado, radio hidráulico y área, de variación aguas abajo para diferentes ríos en el mundo según de Simons y Albertson y otros.	19
<b>Tabla 5.</b> Valores del exponente de ajuste en la ecuación de geometría hidráulica caudal medio anual o banca llena y la carga total en suspensión en la variación hacia aguas abajo en diferentes cauces fluviales.	19
<b>Tabla 6.</b> Valores de exponentes de ajuste de la ecuación de geometría hidráulica caudal medio anual o banca llena -pendiente hidráulica de variación aguas abajo en diferentes canales fluviales.	19
<b>Tabla 7.</b> Valores del exponente de ajuste en la ecuación de geometría hidráulica que relaciona el caudal medio anual (o a banca llena) y la rugosidad de Manning ( $n$ ) en la variación hacia aguas abajo en diferentes canales fluviales.	20
<b>Tabla 8.</b> Valores del coeficiente “a” de proporcionalidad en la ecuación $B = a Q^{0.5}$ para diferentes caudales (Nixon, 1959).	23
<b>Tabla 9.</b> Valores de los exponentes en las ecuaciones de geometría hidráulica de la variación aguas abajo que relacionan el caudal y la rugosidad en los ríos de Norteamérica.	27
<b>Tabla 10.</b> Cuencas Hidrográficas Tributarias del Río Cauca.	35
<b>Tabla11:</b> Oxígeno disuelto en estaciones del río Cauca.	38
<b>Tabla12:</b> Deterioro del recurso hídrico.	39
<b>Tabla 13.</b> Datos generales estaciones hidrométricas operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.	40
<b>Tabla 14.</b> Validación de las relaciones de geometría hidráulica entre el caudal y las variables ancho profundidad hidráulica y velocidad en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca período Pre-Salvajina.	62
<b>Tabla 15.</b> Validación de las relaciones de geometría hidráulica entre el caudal y las variables ancho profundidad hidráulica y velocidad en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca período Post-Salvajina.	63
<b>Tabla 16:</b> Comparación de los exponentes $b, d$ y $f$ obtenidos para el río Cauca.	63
<b>Tabla 17.</b> Resumen de las relaciones de geometría hidráulica en las estaciones del río Cauca entre el caudal y las variables ancho, profundidad y velocidad.	64
<b>Tabla 18.</b> Resumen de las relaciones de geometría hidráulica en las estaciones del río Cauca entre el caudal y las variables área, perímetro mojado y radio hidráulico.	65
<b>Tabla 19.</b> Resumen de las relaciones de geometría hidráulica en las estaciones del río Cauca entre el caudal y las variables relación de forma, sólidos en suspensión, nivel de agua y número de Froude.	66

<b>Tabla 20:</b> Calculo de las relaciones de forma para sección transversal La Balsa, período post Salvajina.	77
<b>Tabla 21.</b> Caudales a banca llena para y períodos de retorno estaciones hidrométricas río Cauca, período Post-Salvajina.	79
<b>Tabla 22.</b> Caudales característicos en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca para período Post-Salvajina.	
<b>Tabla 23.</b> Parámetros hidráulicos a banca llena en las estaciones sobre el río Cauca para el período Post- Salvajina.	
<b>Tabla 24.</b> Parámetros hidráulicos calculados para el caudal dominante en las estaciones sobre el río Cauca para el período Post- Salvajina.	
<b>Tabla 25.</b> Resumen de ecuaciones de geometría hidráulica aguas abajo para el río Cauca a banca llena, en función del área de drenaje y en función del caudal dominante, período Post- Salvajina.	
<b>Tabla 26.</b> Valores del Ancho, Profundidad Hidráulica, Velocidad y Área para caudales del 80% y 20% de duración para el río Cauca, período Post- Salvajina.	
<b>Tabla 27.</b> Valores del Perímetro Mojado, Radio Hidráulico, Factor de forma, Nivel de Agua y Número de Froude para caudales del 80% y 20% de duración para el río Cauca, período Post- Salvajina.	

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Geometría hidráulica promedia de cauces fluviales expresada por las relaciones entre el caudal y los parámetros ancho, profundidad, velocidad, carga de sedimentos en suspensión, rugosidad, y pendiente, para variación en estación y en dirección aguas abajo. Tomado de Fluvial Processes in Geomorphology; por L. Leopold, Wolman y Miller (1964).	22
<b>Figura 2.</b> (a) Diagrama de geometría hidráulica. Curvas de variación en estación y hacia aguas abajo y curvas en dirección aguas abajo para duraciones de flujo del 5 % al 50% b) Relación entre los exponentes de la profundidad y la velocidad con el exponente de la pendiente para varios valores del exponente de la rugosidad de Manning ( $y_1=0, -0.2, -0.4$ y $-0.5$ ), (asumiendo $B \propto Q^{0.5}$ ) (Leopold y Miller, 1956). c) Tendencia aguas abajo de la velocidad para ríos de Wyoming y Montana. Tomado de Rivers, Keith Richards, pag. 156.	25
<b>Figura 3.</b> Relación ancho-caudal aguas abajo en la región Xingua-Araguaia, ilustrando la diferencia de las tendencias entre los ríos tributarios de la cabecera y la corriente principal.	28
<b>Figura 4.</b> Trayecto de análisis- Valle del cauca.	36
<b>Figura 5.</b> Localización de las estaciones hidrométricas operadas por la CVC.	41
<b>Figura 6:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Ancho para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	43
<b>Figura 7:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Profundidad hidráulica para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	45
<b>Figura 8:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Velocidad para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	47
<b>Figura 9:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Área para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	49
<b>Figura 10:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Sólidos en Suspensión para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	51
<b>Figura 11:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Radio hidráulico para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	53
<b>Figura 12:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Perímetro Mojado para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	55
<b>Figura 13:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Número de Froude para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	57
<b>Figura 14:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Relación de Forma para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	59
<b>Figura 15:</b> Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Nivel de Agua para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.	61
<b>Figura16.</b> Variaciones de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica en estación para los períodos Pre-Salvajina, Post-Salvajina y General para estaciones sobre el río Cauca.	69
<b>Figura 17.</b> Relación de exponentes de geometría hidráulica para estaciones sobre el río	72

Cauca, período Post-Salvajina.

**Figura 18.** Secciones transversales de las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca, período Post-Salvajina. 73

**Figura 19.** Curvas de duración de caudales diarios, estaciones sobre el río Cauca. 75

**Figura 20.** Sección transversal, estación hidrométrica La Balsa. 77

**Figura 21.** Relaciones de forma vs Profundidad Máxima, estación La Balsa, período Post Salvajina. 78

**Figura 22.** Caudales a banca llena y períodos de retorno para estaciones hidrométricas sobre el río Cauca para el período Post-Salvajina. 79

**Figura 23.** Caudal a banca llena en función del caudal medio en el río Cauca. Tramo La Balsa- Anacaro, período Post- Salvajina. 82

**Figura 24:** Relaciones regionales de geometría hidráulica en función del Área de drenaje para el río Cauca, período Post-Salvajina. 83

**Figura 25:** Relaciones regionales de geometría hidráulica en función del Caudal a banca llena para el río Cauca, período Post-Salvajina. 84

**Figura 26:** Relaciones regionales de geometría hidráulica en función del Caudal dominante para el río Cauca, período Post-Salvajina. 84

**Figura 27.** Relaciones regionales de geometría hidráulica en el río Cauca en su valle alto en el período Post- Salvajina. 87

## 0. INTRODUCCIÓN

Las características morfológicas de un río aluvial son afectadas y determinadas por varios parámetros y variables, que se hallan relacionados entre sí. Los principales componentes que determinan la forma de un cauce aluvial son: los caudales líquidos, la pendiente, la carga de sedimentos, la geología y la resistencia al flujo. La forma y tamaño de la sección transversal del cauce dependen, entonces, de la magnitud y frecuencia de los caudales que por él transitan, el grado de resistencia a la erosión de los suelos y las orillas del cauce, la topografía del terreno y el tipo y cantidad de sedimentos presentes, debido que para llevar a cabo una gestión integral de los ríos, es fundamental comprender su comportamiento hidráulico morfológico.

La geometría hidráulica de un río permite descubrir y entender sus características geométricas, hidráulicas y sedimentológicas por medio de relaciones entre el caudal y diferentes parámetros tales como, la profundidad y el ancho del cauce, el área mojada, la velocidad del flujo, el radio hidráulico, el factor de forma, el transporte de sedimentos, la rugosidad, etcétera.

El presente estudio tiene por objeto la determinación de la geometría hidráulica local y regional del río Cauca en su valle alto en el tramo comprendido entre Salvajina-La Virginia, en su condición actual y la evolución histórica de su cauce principal en lo referente a las características hidráulicas. La geometría hidráulica del río obtuvo con base en la información registrada históricamente por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca en diez estaciones hidrométricas localizadas sobre el río Cauca (Suárez, La Balsa, Tablanca, La Bolsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria y Anacaro). La información disponible corresponde a hidrología de la región, batimetrías, aforos líquidos y sólidos.

Puesto que la entrada en operación del embalse de Salvajina modificó el régimen de caudales del río Cauca, se estimó conveniente analizar el comportamiento y variación de los diferentes parámetros hidráulicos y geométricos para el período anterior a Salvajina (denominado período Pre-Salvajina) y para el período posterior a la puesta en operación de Salvajina (denominado período Post-Salvajina), además de un período general, que comprende todos los registros disponibles en su totalidad. Se presenta también un análisis comparativo de la variación de los parámetros hidráulicos y geométricos en estos tres períodos.

En adición a lo anterior, en el presente estudio se obtuvo la geometría hidráulica aguas abajo para el río Cauca en su Valle Alto, considerando tres caudales característicos para cada sección transversal los cuales son: el caudal dominante, el caudal a banca llena y el caudal medio. Los cuales se relacionaron con ecuaciones de tipo potencial, con las variables hidráulicas, geométricas y el área de drenaje aferente a cada estación. Por último se obtuvo análisis comparativo de las condiciones hidráulicas aguas abajo, teniendo en cuenta dos frecuencias de descarga, las cuales son 20% y 80%; en las que se analizó el comportamiento de las variables hidráulicas a lo largo del río Cauca entre las estaciones La Balsa y Anacaro.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El caudal es por definición la cantidad de agua que pasa por la sección transversal en la unidad de tiempo, expresada por ejemplo en metros cúbicos por segundo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). En lo que se refiere a la profundidad se considerará como la profundidad media de agua o profundidad hidráulica y el ancho corresponderá al ancho superior de la superficie libre de agua.

Consideremos un canal natural que fluye en un solo cauce aluvial; en una condición inicial de bajo caudal. Se tiene entonces, que cuando la descarga se incrementa, también debería incrementarse la profundidad y el ancho. Parte del incremento en la profundidad se puede considerar por socavación si el material del lecho puede ser erodado, aunque la socavación realmente no puede iniciarse inmediatamente se den los aumentos de los niveles. Parte del incremento en el ancho resultará simplemente del levantamiento o incremento de los niveles de la superficie del agua, pero parte de algunas secciones puede involucrar la remoción temporal y permanente de material de las bancas u orillas. La velocidad puede incrementarse con incrementos en el caudal, como respuesta al agrandamiento de la sección transversal y la asociada reducción promedia de la fricción en el movimiento del flujo del agua.

Variaciones en éstas y otras características hidráulicas y geométricas en una determinada sección transversal son denominadas variaciones en estación. La velocidad, la profundidad y el ancho pueden ser expresadas como funciones potenciales de la descarga. La probabilidad de encontrar el orden en las variaciones de estas cuatro características es, sin embargo, probablemente menos importante que la inferencia general indicada, a saber, qué valores de ancho, profundidad, y velocidad no pueden ser usados para los propósitos comparativos a menos que ellos estén de alguna manera asociados a la frecuencia de la descarga. No tendría sentido comparar una sección transversal con flujo bajo con otra en flujo alto.

Las variaciones de las características hidráulicas a lo largo de la longitud de una corriente se denominan variaciones aguas abajo o variaciones regionales. **Leopold y Maddock**(1953) investigaron estas características, principalmente referidas a la descarga media anual, encontrando que la velocidad, la profundidad y el ancho pueden ser expresados como una función potencial de la descarga. Sin embargo, los valores usualmente difieren de los obtenidos para las variaciones de la estación. Es posible obtener los gráficos combinados mostrando las variaciones de la estación en la velocidad, la profundidad, y el ancho con la descarga para una frecuencia dada.

A diferencia de los ajustes experimentales de **Leopold y Maddock** (1953), valores promedios de todos los coeficientes de ajuste han sido obtenidos por otros autores, para la amplia gama de grupos de datos considerados, los cuales fueron clasificados de acuerdo con las características del material constituyente del fondo y los taludes del cauce.

Toda la atención se centra en la selección apropiada de las diferentes constantes, las cuales en general son difíciles de obtener, debido en algunos casos, a la falta de promedios que se puedan generalizar y que sean a la vez consistentes.

Se puede decir que es posible llevar a cabo el análisis y estudio de un tramo de un río aluvial evaluando la geometría hidráulica de las secciones representativas del mismo empleando diferentes ecuaciones y coeficientes disponibles, los cuales se pueden agrupar en dos categorías:

- ***Obtenidos de mediciones de un río en particular.*** En esta categoría se ubican coeficientes obtenidos para los ríos San Juan y Séneca de Estados Unidos. En ambos casos el exponente ***b*** asociado a las variaciones del ancho, fue bajo evidenciando una sección tipo cajón, con taludes cohesivos.

- ***Obtenidos como promedios de un gran número de datos.*** Esta categoría involucra los coeficientes resultantes a partir del estudio desarrollado por ***Simons*** y ***Albertson (1963)***.

Seleccionados los coeficientes a emplear, la aplicación de las ecuaciones se realiza para los caudales considerados.

La geometría hidráulica corresponde al análisis de las relaciones existentes entre las descargas y las características hidráulicas del cauce del río. Estas características incluyen el ancho, la profundidad, la pendiente, la descarga, la velocidad y la carga del material del lecho. El material del lecho es una variable independiente debido a que sus propiedades son determinadas por el lecho rocoso que aflora en el suelo o las orillas del cauce; y porque sus propiedades son controladas por la geología del área de drenaje. El material suelto, sin embargo, se puede moldear durante el tránsito, y sufrirá una reducción de tamaño y cambio de forma. Las características restantes interactúan recíprocamente entre sí en una forma compleja.

La mayoría de los ríos experimentan un amplio rango de caudales o flujos. Debido a que en un tramo de canal o una sección dada deben pasar cantidades variables de agua provenientes de una sección del cauce de aguas arriba, se tendrá para las diferentes descargas observadas una velocidad media, una profundidad media, y ancho para el flujo de agua reflejando las características hidráulicas del cauce para la sección transversal dada.

## **1.2 INTERRELACIONES ENTRE EL CAUDAL Y LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS**

Existen en la literatura diversos intentos por relacionar las características geométricas e hidráulicas de una sección con el caudal que circula por ella. La geometría hidráulica describe el carácter de los cauces en una cuenca a través de las relaciones entre el caudal, y las características de la carga de sedimentos, el ancho, la profundidad y la velocidad media. Las gráficas de los parámetros velocidad, profundidad y ancho del cauce como una función de la descarga en una sección transversal constituyen una parte de lo que ***Leopold*** y ***Maddock (1953)*** llamaron geometría hidráulica del flujo en canales o geometría hidráulica de una corriente.

Las ecuaciones que expresan las relaciones entre los factores hidráulicos en canales de riego, son similares a aquellas relaciones que describen la geometría hidráulica promedio de un río, por lo cual es posible evaluar las características hidráulicas de las secciones transversales a partir de las ecuaciones de geometría hidráulica.

En general, las relaciones de geometría hidráulica obtenidas para canales de riego presentan menor dispersión de datos que en el caso de ríos. Sin embargo, en ambos casos está implicado el auto ajuste de la corriente que posibilita definir un tamaño y forma apropiada de la sección para el caudal que debe conducir y el tipo y cantidad de sedimentos presentes.

Una evidencia experimental importante expuesta por diversos autores, demuestra que los parámetros de ancho, profundidad media y velocidad media de una sección transversal, se relacionan con el caudal mediante funciones de tipo potencial como las mostradas a continuación:

$$B = aQ^b$$

$$D = cQ^d$$

$$V = eQ^f$$

Donde:

$B =$  Ancho Superior (m)  
 $D =$  Profundidad Hidráulica (m)  
 $V =$  Velocidad media (m/s)  
 $Q =$  Caudal o Descarga (m<sup>3</sup>/s)

$a, c, e$  Coeficientes de proporcionalidad de las ecuaciones de *Leopold* y *Maddock*

=

$b, d, f$  Exponentes de las ecuaciones de *Leopold* y *Maddock*, que dependen del cauce y de la zona de estudio.

Puesto que:

$$Q = V \times A = V \times D \times B$$

Se debe cumplir que:

$$b+d+f = 1$$

$$a \times c \times e = 1$$

El problema central para la aplicación de estas metodologías reside en la adecuada selección de los coeficientes y exponentes en las diferentes ecuaciones que relacionan el caudal con las diferentes características hidráulicas y geométricas.

El carácter eminentemente empírico de este procedimiento, impide disponer de formulaciones generales de aplicación. La bibliografía muestra al respecto, los resultados de situaciones particulares de un determinado río, considerando los coeficientes obtenidos de un promedio de un conjunto de datos para un río específico. En este sentido la selección apropiada de las constantes a emplear incide significativamente sobre los resultados que se obtengan.

El análisis desarrollado por *Leopold* y *Maddock* (1953), logró obtener valores promedios de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica, pero no se obtuvieron valores promedio, ni representativos de los coeficientes  $a, c$  y  $e$ .

Las gráficas en las cuales los valores de las características geométricas e hidráulicas de un canal se relaciona con la descarga, para una sección transversal de un río dado son



denominadas “**curvas de la estación**” para diferenciarlas de los gráficos similares que describen como cambian los parámetros hacia aguas abajo con el incremento de la descarga por la continua contribución o aporte de ríos tributarios a la corriente principal en estudio. En muchos casos estas gráficas, que describen muchas secciones transversales de ríos naturales, tienden a ser líneas rectas al ser dibujadas sobre papel logarítmico.

En la **Tabla 1** se presenta un resumen de valores promedios de los exponentes y los coeficientes para diferentes grupos de datos analizados en secciones transversales de diversos ríos en el mundo, los cuales proveen una indicación del rango de valores de los exponentes y coeficientes en las ecuaciones de Leopold y Maddock para variación en estación.

**Tabla 1.** Valores de exponentes y coeficientes de ajuste para variación en estación de las ecuaciones de geometría hidráulica caudal –ancho, profundidad hidráulica y velocidad en diferentes cauces fluviales

Autor Investigador	Sitio	$B = a.Q^b$		$D = c.Q^d$		$V = e.Q^f$	
		$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
Leopold y Maddock (1953)	Valores promedios Medio Oeste USA	-	0.26	-	0.40	-	0.34
Wolman (1955)	Brandywine Creek, Pennsylvania	-	0.04	-	0.41	-	0.55
Brush (1961)	Corrientes efímeras en USA zonas semiáridas Corrientes Apalaches	-	0.29	-	0.36	-	0.34
-	Promedio de 158 estaciones de calibración USA	-	0.12	-	0.45	-	0.43
-	Promedio de 10 estaciones en el río Rhin	-	0.13	-	0.41	-	0.43
Leopold, Wolman y Miller	Río Séneca	23.96	0.18	0.096	0.52	0.44	0.30
	Río San Juan	127.4	0.046	0.015	0.64	0.41	0.33

### 1.3 VARIACIÓN AGUAS ABAJO DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL CAUCE

La morfología de las secciones transversales a lo largo del cauce se modifica y ajusta según los cambios que experimentan el caudal y la carga de sedimentos. El concepto de “**geometría hidráulica aguas abajo**” o “**geometría hidráulica regional**” utiliza las relaciones de las funciones de potencia mencionadas anteriormente, para describir las tendencias en las variables dependientes de la descarga (*Leopold y Maddock*, 1953), abarcando dos formas de análisis.

La primera aproximación considera cambios aguas abajo en la geometría del flujo con la variación en toda la sección transversal y teniendo en cuenta una frecuencia constante de caudal, de forma que las comparaciones entre secciones (ancho de flujo, profundidad, velocidad, etcétera) son efectuadas para una duración estándar del flujo o período de retorno definido. Una limitación inherente de esta aproximación geomorfológica es que la frecuencia de caudal seleccionado puede ser competente o adecuada en algunas secciones y en otras no y, por consiguiente, la frecuencia se torna como una variable de importancia. La comparación de varias secciones transversales a lo largo de tramo de un cauce es más conveniente si esta comparación se realiza para caudales de un determinado intervalo de recurrencia o período de retorno representativo para cada sección.

La segunda aproximación representa la analogía geomorfológica de la “**teoría del régimen**”, el cual es un método empírico, para determinar las dimensiones de un cauce artificial estable,

utilizando para ello caudales que transporten sedimentos como por ejemplo el caudal dominante. El ajuste aguas abajo de la sección transversal del canal a banca llena es analizada relacionando el ancho, la profundidad, el área y la pendiente del nivel de las orillas (superficie del agua a banca llena) con la descarga estimada a banca llena ( $Q_{bf}$ ). La velocidad y la rugosidad son entonces derivados de  $V = Q_{bf} / (B.D)$  y una relación de resistencia o fricción (Manning, Chezy, etcétera).

La descarga más determinante en la morfología del cauce es aquella que forma y mantiene el canal, esta descarga se conoce generalmente como el caudal formativo o dominante. La determinación de este caudal es un problema muy complejo e incluso algunos autores cuestionan si es acertado indicar un caudal único como el que determina la morfología de un canal. Algunos autores indican que el caudal formativo puede aproximarse a la descarga a banca llena ( $Q_{bf}$ ). En muchos ríos la descarga a banca llena ( $Q_{bf}$ ) es la correspondiente a una frecuencia de recurrencia de 1.5 años (Leopold, 1964).

La descarga a banca llena debe ser obtenida indirectamente en secciones no aforadas donde no existan curvas de calibración. Esto puede ser calculado usando la ecuación de Manning. Alternativamente puede ser usada, una relación de regresión entre un índice de caudales máximos y las propiedades físicas y climáticas de estaciones hidrométricas aforadas en el mismo cauce y que sean hidrológicamente compatibles con la zona de estudio. Tales modelos de regresión a menudo son definidos sólo para índices estándar de caudales máximos ( $Q_{1.58}$  o  $Q_{2.33}$ ) más que a caudales a banca llena. Para seleccionar cuál de estos caudales emplear es necesario hacer algunas suposiciones, por ejemplo, que la relación  $Q_{2.33}: Q_{bf}$  o  $Q_{1.58}: Q_{bf}$  es constante, o que estos eventos son equivalentes (Brush, 1961). El área de la cuenca (área de drenaje o captación) o la longitud total del cauce aguas arriba pueden ser usados como sustitutos para la descarga en ríos perennes (Hack, 1957).

En muchos ríos se ha encontrado que similares relaciones son obtenidas para cambios aguas abajo, si se usan la descarga media o la descarga a banca llena como base de comparación (Leopold y Maddock, 1953). Entre más datos disponibles del caudal medio anual existan, se tendrá una medida más conveniente para la comparación de los caudales de los ríos; aunque es importante reconocer que en la mayoría de los casos, el caudal medio anual no es el responsable de los cambios en la morfología del cauce, sino que refleja simplemente los cambios producidos por los flujos más persistentes en el río.

La descarga media anual tiende a tener una frecuencia similar de ocurrencia en muchos ríos de diferentes tipos. Se ha encontrado que este flujo es igualado o excedido en promedio el 25 % del tiempo. La descarga media anual usualmente llena solo una tercera parte de la profundidad a banca llena en la sección del canal.

El ancho, la profundidad media y la velocidad media correspondiente a la descarga media anual, se pueden dibujar contra un caudal de referencia como el caudal a banca llena o caudal dominante, obteniendo así curvas de geometría hidráulica regional de los cauces fluviales. Además, los canales de irrigación estables en la India que permiten la erosión y la sedimentación para lograr una forma de equilibrio, parecen ser similares a los cauces de los ríos naturales. En conclusión muchos ríos tienden a incrementar aguas abajo el ancho, la profundidad y la velocidad media de una manera muy similar.

En la **Tabla 2** se presentan los coeficientes y los exponentes para variación aguas abajo en las ecuaciones de geometría hidráulica caudal versus ancho, profundidad hidráulica y velocidad media obtenidas en diversos estudios. El coeficiente y el exponente de la relación caudal-ancho varían entre 1.32 y 5 y de 0.42 a 0.54 respectivamente; para la relación caudal-profundidad hidráulica varían entre 0.10 y 0.93 y de 0.27 a 0.45 y el exponente de la relación caudal-velocidad varía entre 0.05 y 0.22.

**Tabla 2.** Valores de los exponentes y los coeficientes de ajuste en las ecuaciones de geometría hidráulica que relacionan el caudal medio anual o a banca llena con el ancho, la profundidad hidráulica, y la velocidad en la variación aguas abajo en diferentes cauces aluviales.

Investigador	Tamaño Sedimento	$B = aQ^b$		$D = cQ^d$		$V = eQ^f$	
		$a$	$b$	$c$	$d$	$e$	$f$
Valores promedio de medio Oeste USA	-	-	0.5	-	0.4	-	0.1
Brandywine Creek Pennsylvania	-	-	0.42	-	0.45	-	0.05
Corrientes efímeras en zonas semiáridas en USA	-	-	0.5	-	0.3	-	0.2
Corrientes Apalaches	-	-	0.55	-	0.36	-	0.09
Lacey (1929)	0.1 mm <D50<0.4 mm	2.67	0.5	0.47	0.33	-	0.17
Bose (1936)	-	2.8	0.5	0.47	0.33	-	0.17
Leopold (1956)	0.7 mm <D50<5 mm	5	0.5	0.1	0.28	-	0.22
Inglis (1949,1957)	D50 $\approx$ 0.2 mm	-	0.5	-	0.33	-	0.17
Nixon (1959)	0.1 mm <D50<0.6 mm	1.67	0.5	0.55	0.33	-	0.17
Nash (1959)	-	1.32	0.54	0.93	0.27	-	0.19
Simons y Albertson (1960)	0.03 mm <D50<0.08 mm	2.5	0.51	-	-	-	-
Ackers (1964)	0.16 mm <D50<0.34 mm	3.6	0.42	0.28	0.43	-	0.15
Laptured (1969)	-	2.58	0.5	0.52	0.33	-	0.17
Pettis	Ríos de Miami USA	4.44	0.5	-	0.3	0.5	0.2
Bray (1973)	-	2.38	0.527	0.266	0.333	-	-
<b>Rango de variación de los coeficientes y los exponentes</b>		1.32 a 5	0.42 a 0.54	0.10 a 0.93	0.27 a 0.45	-	0.05 a 0.22

En la **Tabla 3** se presentan las ecuaciones múltiparamétricas, obtenidas por diversos autores en los cuales se calculan las variables ancho, profundidad hidráulica y velocidad media en función de diversos caudales entre los cuales se encuentran el caudal de creciente para los 2 años, y el caudal a banca llena.

**Tabla 3.** Ecuaciones multiparamétricas obtenidas con el caudal de creciente de 2 años ( $Q_2$ ) y a banca llena para ( $Q_{bf}$ ) el ancho y la profundidad hidráulica, en la variación aguas abajo en diferentes cauces aluviales.

Investigador	Tamaño de Sedimento	Ancho, B (m)	Profundidad Hidráulica ,D (m)
Glover y Florey (1951)	-	$B = 0.93D_{50}^{-0.15}Q_{bf}^{0.46}$	$D = 0.12D_{50}^{-0.15}Q_{bf}^{0.46}$
Bray (1982) Método del umbral	19mm<D <sub>50</sub> <145mm Caudal de creciente $Q_2$	$B = 2.67Q_2^{0.5}$	$D = 0.0585D_{50}^{-0.29}Q_2^{0.428}$
Bray (1982) Método de Kellerhals	19mm< D <sub>50</sub> <145mm Caudal de creciente $Q_2$	$B = 1.8Q_2^{0.5}$	$D = 0.166D_{50}^{-0.12}Q_2^{0.4}$
Bray (1982) Método de Regresión	19mm< D <sub>50</sub> <145mm Caudal de creciente $Q_2$	$B = 2.08D_{50}^{-0.07}Q_2^{0.528}$	$D = 0.256D_{50}^{-0.05}Q_2^{0.331}$
Bray (1982) Método Dimensional	19mm< D <sub>50</sub> <145mm Caudal de creciente $Q_2$	$B = 2D_{50}^{-0.05}Q_{bf}^{0.54}$	$D = 0.157D_{50}^{-0.008}Q_2^{0.397}$
Hey ( 1982)	21mm< D <sub>50</sub> <190mm	$B = 2.2D_{50}^{-0.05}Q_{bf}^{0.46}$	$D = 0.161D_{50}^{-0.15}Q_{bf}^{0.41}$
Ghost (1983)	>6mm	$B = 0.87D_{50}^{-0.15}Q_{bf}^{0.46}$	$D = 0.11D_{50}^{-0.15}Q_{bf}^{0.46}$
Hey y Thorne (1983)	14mm< D <sub>50</sub> <176mm	$B = 4.3Q_2^{0.5}$	$D = 0.16D_{50}^{-0.15}Q_{bf}^{0.46}$

**Nota:** ( $Q_2$ )= Caudal de creciente de 2 años  
( $Q_{bf}$ )= Caudal a banca llena

Ente los investigadores (*Simons y Albertson, 1963*), sistematizaron 60 años de información sobre la cual se fundamentaron los desarrollos de la Teoría de Régimen y, a partir del análisis de la misma, establecieron las relaciones de geometría hidráulica en términos similares a las anteriormente consideradas (**ver Tabla 3**).

Las relaciones propuestas por estos autores son similares a las planteadas para el estudio de variación en estación:

$$P = c_1 \times Q^{e_1}$$

$$R = c_2 \times Q^{e_2}$$

$$A = c_3 \times Q^{e_3}$$

$P$  = Perímetro mojado.

$R$  = Radio hidráulico.

$A$  = Área mojada.

$Q$  = Caudal o descarga.

$c1, c2, c3, e1, e2, e3$  = Coeficientes y exponentes de ajuste.

Los estudios de *Simons y Albertson (1963)* se basan en un gran número de datos, entre los cuales se tienen:

i) Sistemas de cauces de la India (Punjab y Sind).

ii) Sistemas de cauces de Estados Unidos (Valle Imperial, Valle de San Luis, Cauces en Wyoming, Colorado y Nebraska).

iii) Otros veinticuatro sistemas de cauces de otros países.

Por otra parte **Pettis (1937)** obtuvo las relaciones entre la descarga contra la velocidad media y el área de los cauces aluviales a partir de datos del río Miami en los Estados Unidos. Los datos relacionados con dichos estudios se relacionan en la **Tabla 4**.

**Tabla 4.** Coeficientes y exponentes de ajuste de las ecuaciones de geometría hidráulica caudal- perímetro mojado, radio hidráulico y área, de variación aguas abajo para diferentes ríos en el mundo según de Simons y Albertson y otros.

Investigador	Tipo de Lecho	Perímetro		Radio		Área	
		c <sub>1</sub>	e <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	e <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	e <sub>3</sub>
Simons y Albertson	Lecho de arena	4.744	0.512	0.473	0.361	2.245	0.873
	Lecho cohesivo	2.24	0.512	0.52	0.361	1.168	0.873
Pettis	Cauce Aluvial	4.44	0.5	0.45	0.3	2	0.8

En la **Tabla 5** se presenta una relación de los exponentes para variación aguas abajo en la ecuación de geometría hidráulica caudal-transporte de sedimentos en suspensión obtenidas por diferentes autores. El exponente  $j$  del caudal varía entre 0.8 y 1.3, el cual muestra que el transporte de sedimentos en suspensión se incrementa con el aumento del caudal.

**Tabla 5.** Valores del exponente de ajuste en la ecuación de geometría hidráulica caudal medio anual o banca llena y la carga total en suspensión en la variación hacia aguas abajo en diferentes cauces fluviales

Investigador	Sitio	$Ss = pQ^j$
		$j$
Leopold y Maddock (1953)	Valores promedios Medio Oeste USA	0.8
Brush (1961)	Corrientes efímeras en USA zona semiárida. Corrientes Apalaches	1.3

En la **Tabla 6** se presenta una relación de los exponentes para variación aguas abajo en la ecuación de geometría hidráulica caudal-pendiente hidráulica obtenida en diversos estudios. El exponente  $z$  para variación aguas abajo es negativo variando en un rango de  $-0.49$  a  $-1.07$ , lo cual significa que la pendiente disminuye con el aumento del caudal.

**Tabla 6.** Valores de exponentes de ajuste de la ecuación de geometría hidráulica caudal medio anual o banca llena -pendiente hidráulica de variación aguas abajo en diferentes canales fluviales

Investigador	Sitio	$S = tQ^z$
		$z$
Leopold y Maddock (1953)	Valores promedios Medio Oeste USA	-0.49
Langbein (1960)	Usando otros valores para los caudales, a los usados por Leopold y Maddock	-0.75
Wolman (1955)	Brandywine Creek, Pennsylvania	-1.07
Brush (1961)	Corrientes efímeras en USA zonas semiáridas Corrientes Apalaches	-0.95

En la **Tabla 7** se presenta una relación de los exponentes para variación aguas abajo de geometría hidráulica caudal-rugosidad aluvial de Manning obtenidos en diversos estudios. Se puede observar que los exponentes del caudal ( $y$ ) son negativos indicando que

la rugosidad aluvial disminuye con el incremento del caudal y se tienen valores desde  $y = -0.28$  hasta  $y = -0.75$ .

**Tabla 7.** Valores del exponente de ajuste en la ecuación de geometría hidráulica que relaciona el caudal medio anual (o a banca llena) y la rugosidad de Manning ( $n$ ) en la variación hacia aguas abajo en diferentes canales fluviales

Investigador	Sitio	$n = rQ^y$
		$y$
Leopold y Maddock (1953)	Valores promedios Medio Oeste USA	-0.75
Wolman (1955)	Brandywine Creek, Pennsylvania	-0.28
Brush (1961)	Corrientes efímeras en USA zonas semiáridas Corrientes Apalaches	-0.3

La **Figura 1** resume la geometría hidráulica de un sistema fluvial para valores promedios de los exponentes. La sección transversal **A** representa una estación aguas arriba en la cabecera del río (cuando presenta caudales bajos), su posición se presenta en el diagrama del bloque superior de una cuenca en donde el caudal bajo prevalece. La sección transversal **C** representa la estación aguas arriba en la cabecera del río (cuando presenta caudales altos). Igualmente, **B** corresponde a la sección de aguas abajo para caudales bajos y **D** la sección para caudales altos.

La pendiente de las líneas en las gráficas representan las condiciones promedias observadas en los ríos. En la gráfica ancho-caudal, la línea **A0B0** tiene una pendiente ascendente a la derecha de 0.5, en la expresión  $B = a Q^b$  con  $b = 0.5$ , la cual es representativa del incremento del ancho con la descarga aguas abajo. Similarmente, la línea **A0C0** representa el incremento del ancho con la descarga en la misma estación localizada en la estación aguas arriba en la cabecera.

La gráfica de la carga de sedimentos en suspensión muestra cómo ésta se incrementa rápidamente con la descarga en una estación (línea **A3C3**, con una pendiente de  $J = 2.5$ ); Sin embargo en la dirección aguas abajo la carga de sedimentos en suspensión aumenta en la misma proporción que la descarga o ligeramente menos rápido que la descarga, tal como lo muestra la línea **A3B3** la cual tiene una pendiente de 0.8.

La rugosidad aluvial del cauce en una estación decrece con el aumento de la descarga, esto puede ser generado por la disminución en el tamaño de los sedimentos hacia aguas abajo y está sustentado también por el cambio de la velocidad, profundidad y pendiente en esa dirección.

La línea **A5C5** corresponde a la gráfica de la pendiente de la línea de energía y el caudal, la cual indica una tendencia de un incremento muy ligero de la pendiente con la descarga en la estación, lo cual es causado tal vez por la tendencia de una reducción ligera del curso que tomada el agua con el incremento de la descarga.

Como la velocidad se incrementa en una estación con el incremento de la descarga es importante notar que la tendencia de la velocidad es permanecer constante o incrementarse hacia aguas abajo. En general, los datos de muchos ríos indican que en dirección aguas abajo se presenta un ligero aumento de velocidad a nivel de banca llena.

Considerando un incremento aguas abajo de la descarga para una frecuencia dada, el canal debe paulatinamente ajustar el incremento del flujo de diferentes maneras. El canal puede incrementar su ancho, mientras permanece constante la profundidad y la velocidad, o podría aumentar su velocidad, mientras permanece constante la profundidad y el ancho todo ello dependiendo del grado de resistencia la erosión tanto de las orillas como del lecho del cauce. Cada combinación requiere de cambios simultáneos en la pendiente del cauce y los diferentes perfiles longitudinales, dependiendo de los cambios aguas abajo de la resistencia al flujo.

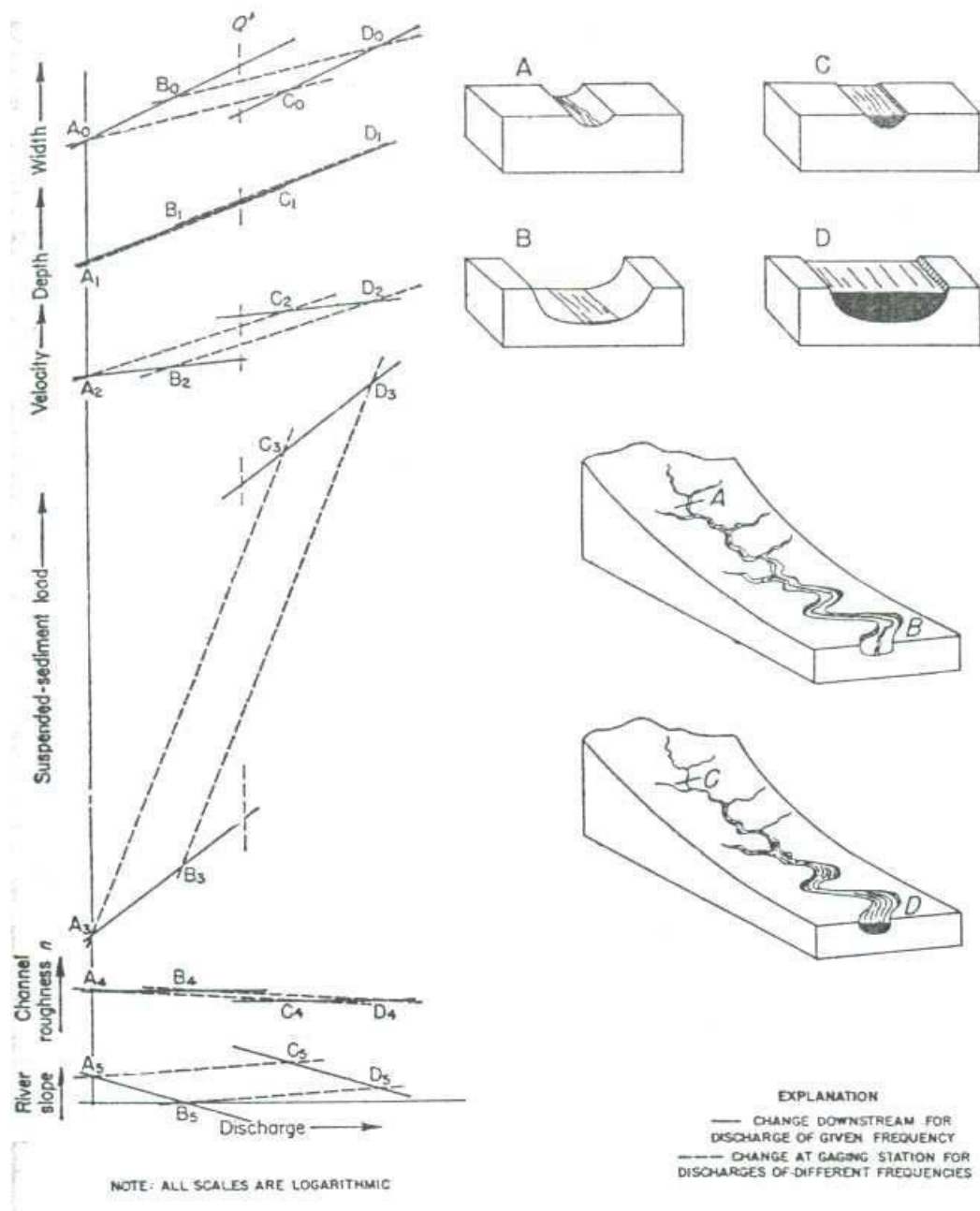
En realidad, para el sistema fluvial lo cierto es que los valores de los exponentes son bastante conservadores. El ancho usualmente aumenta de una manera más consistente que cualquier otro factor, alrededor de la raíz cuadrada del caudal, y la velocidad media aguas abajo tiende a aumentar ligeramente en la mayoría de los ríos.

La consistencia con que los ríos de varios tamaños y en diferentes escenarios fisiográficos se ajusten aguas abajo con el incremento de la descarga sugiere que hay una tendencia general común o principio físico que gobierna estos ajustes. Debido a que los ajustes del cauce se relacionan estrechamente con el perfil del río, se debe antes explicar el principio físico que gobierna los ajustes de pendiente y la forma.

En la **Figura 2a** se ilustra la deducción y característica del diagrama de geometría hidráulica (diagrama de **Leopold y Maddock** adaptado por **Richards**, 1982), el cual debe ser visto como una aproximación simplificada de la tendencia general debido a la complejidad del comportamiento de variación en estación anteriormente expuesto, y los controles multiparamétricos de los cambios en la forma del canal en la dirección aguas abajo.

Existen diferencias significativas entre la geometría hidráulica aguas abajo entre ríos perennes y efímeros. Los exponentes del ancho, profundidad y velocidad promedio (**b**, **d** y **f**, respectivamente) para variación aguas abajo en ríos de Medio Oeste Americano se definieron como **b** = 0.5, **d** = 0.4 y **f** = 0.1 (ver tabla 1) para la descarga media anual (**Leopold y Maddock**, 1953); posteriormente **Carlston** (1969) corrigió estos valores después de realizar un análisis de las respectivas regresiones a los siguientes valores **b** = 0.46, **d** = 0.38 y **f** = 0.16. Un rápido incremento en dirección aguas abajo del ancho comparado con la profundidad implica un ajuste de la relación ancho/profundidad, y un ajuste relacionado con la forma del canal, siendo en grandes ríos ligeramente mayor en relación a sus profundidades que en cauces pequeños. En cauces efímeros en ambientes semi-áridos, **Leopold y Miller** (1956) definieron exponentes promedio aguas abajo como **b** = 0.5, **d** = 0.3 y **f** = 0.2 para una frecuencia de caudales desconocida, correspondiente a eventos individuales de crecientes rápidas viajando hacia aguas abajo y reduciendo la descarga en la medida que se presentan pérdidas por evaporación y filtración.

**Nixon** (1959) analizó datos de 29 ríos en Inglaterra y Gales y encontró que para estas corrientes existe una correlación del tipo  $B = a Q^{0.5}$ . La constante **a** en esta ecuación depende de la frecuencia del caudal, tal como se muestra en la **Tabla 8**.



**Figura 1.** Geometría hidráulica promedio de cauces fluviales expresada por las relaciones entre el caudal y los parámetros ancho, profundidad, velocidad, carga de sedimentos en suspensión, rugosidad, y pendiente, para variación en estación y en dirección aguas abajo. Tomado de Fluvial Processes in Geomorphology; por L. Leopold, Wolman y Miller (1964).

La geometría hidráulica completa de un río está delimitada por una serie de cuadriláteros, uno por cada variable dependiente. Dos lados del cuadrilátero están definidos por funciones de variación en estación, y los dos lados restantes por funciones para variación aguas abajo. Las relaciones de variación en estación son para una sección aguas arriba y otra sección aguas abajo, mientras que en dirección aguas abajo se tiene una para caudales de alta frecuencia (como puede ser la descarga media anual) y otra para un evento de baja frecuencia (tal como el  $q_{2\%}$  o la creciente media anual,  $q_{2.0}$ ).



**Tabla 8.** Valores del coeficiente “a” de proporcionalidad en la ecuación  $B = a Q^{0.5}$  para diferentes caudales (Nixon, 1959)

% Frecuencia para la cual el caudal es igualado o excedido	30	20	10	5	3.7	0.6 <sup>(a)</sup>
Coeficiente <i>a</i>	8.87	7.61	6.16	5.23	4.84	3 <sup>(a)</sup>

(a) Considerado por *Nixon* como la frecuencia y coeficiente para el caudal o nivel a banca llena

*Nixon* encontró que si se considera la descarga media anual, la constante de proporcionalidad debería ser 7.66, valor que es muy similar para la frecuencia del 20% de acuerdo con la **Tabla 8**. Como ya se mencionó anteriormente, *Leopold* y *Maddock* encontraron que la frecuencia para el caudal medio anual corresponde aproximadamente a un caudal que es igualado o excedido el 25 % del tiempo.

El uso de funciones de potencia implica que el ancho, la profundidad y la velocidad se incrementan hacia aguas abajo hasta el punto de máxima descarga y luego decrecen conforme a la misma relación.

*Langbein* aplicó conceptos estadísticos para estudiar la geometría hidráulica de los cauces aluviales y considero que los sistemas fluviales de zonas húmedas el caudal se incrementa sistemáticamente aguas abajo y que la geometría del cauce responde al caudal dominante. Estos sistemas cumplen las relaciones físicas de la ecuación de continuidad ( $Q = B.D.V$ ) y la ley de resistencia tipo Manning ( $V = R^{2/3} \times S^{1/2}/n$ )

La forma aparentemente consistente de la relación Ancho-Descarga ha tomado la suposición de una raíz cuadrada ( $b = 0.5$ ) del exponente de dicha relación, particularmente en la teoría del régimen o equilibrio (*Lacey*, 1930). Si esta relación es asumida, se tiene que  $f = 0.5 - d$  (ya que  $b+d+f=1$ ).

La ecuación de Manning puede, por consiguiente, ser expresada también en función del caudal considerando las relaciones ya presentes para cada una de las variables involucradas en ella, así:

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (1)$$

$$n = \frac{[c_3 \times Q^{e_3}]^{\frac{2}{3}} \times [t \times Q^z]^{\frac{1}{2}}}{[e \times Q^f]} = \left[ \frac{c_3^{\frac{2}{3}} \times t^{\frac{1}{2}}}{e} \right] \times Q^{\frac{2}{3}e_3 + \frac{1}{2}z + f} \quad (2)$$

Expresando la rugosidad de Manning en función del caudal se tiene:

$$n = r \times Q^y \quad (3)$$

E igualando las expresiones se tiene:

$$r \times Q^y = \left[ \frac{c_3^{\frac{2}{3}} \times t^{\frac{1}{2}}}{e} \right] \times Q^{\frac{2}{3}e_3 + \frac{1}{2}z + f} \quad (4)$$

Considerando la igualdad de los exponentes se tiene:

$$y = \frac{2}{3}e_3 + \frac{1}{2}z + f \rightarrow f = \frac{2}{3}e_3 + \frac{1}{2}z - y \quad (5)$$

$$0.5 - d = \frac{2}{3}e_3 + \frac{1}{2}z - y \quad (6)$$

Y puede simplificarse a la forma:

$$z = 1 - 2d - 1.33e_3 + 2y \quad (7)$$

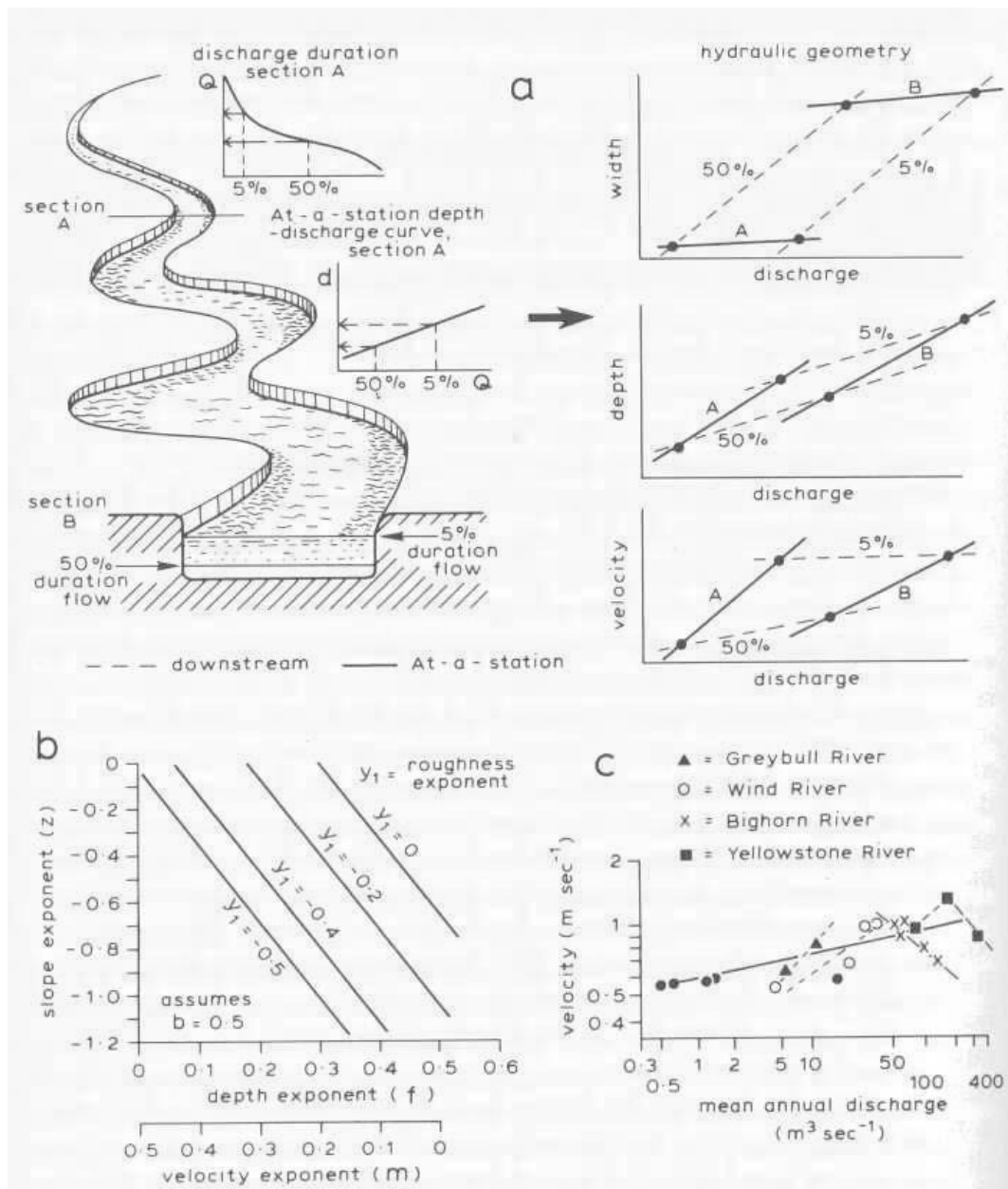
Si se asume que el canal es suficientemente ancho con  $R \approx D$ , entonces la ecuación (6) y (7) se transforman en las siguientes expresiones:

$$0.5 - d = \frac{2}{3}d + \frac{1}{2}z - y \quad (8)$$

$$z = 1 - 3.33d + 2y \quad (9)$$

La ecuación (9) se puede graficar en un diagrama de tres variables que muestra las interrelaciones entre los exponentes (**Figura 2b**).

Los exponentes de la rugosidad y la pendiente aguas abajo son en parte factores independientes relacionados a las tendencias sedimentológicas y a las características inherentes al perfil longitudinal; de esta manera los exponentes de velocidad y profundidad responden a sus influencias. Si la rugosidad aguas abajo es constante (exponente  $y = 0$ ), y si se tiene un exponente de la pendiente (promedio) aguas abajo de  $z = -0.67$ , entonces el exponente de la velocidad será cero. La variabilidad del exponente del ancho debe ser supuesto para dar validez a este esquema, y **Park** (1976) encontró algunas evidencias que soportaron dicha condición.



**Figura 2.** (a) Diagrama de geometría hidráulica. Curvas de variación en estación y hacia aguas abajo y curvas en dirección aguas abajo para duraciones de flujo del 5 % al 50%

b) Relación entre los exponentes de la profundidad y la velocidad con el exponente de la pendiente para varios valores del exponente de la rugosidad de Manning ( $y_1=0, -0.2, -0.4$  y  $-0.5$ ), (asumiendo  $B Q^{0.5}$ ) (Leopold y Miller, 1956).

c) Tendencia aguas abajo de la velocidad para ríos de Wyoming y Montana. Tomado de Rivers, Keith Richards, pag. 156.

Las funciones potenciales que relacionan el área mojada y el área de drenaje de la cuenca presentan exponentes relacionados inversamente dependiendo las condiciones del relieve de la cuenca (**Schumm**, 1956), pues existe un incremento más lento en dirección aguas abajo cuando se tienen áreas de alta pendiente.

Sin embargo, la relación de la raíz cuadrada no puede ser considerada como regla general de la variación caudal-ancho. **Carlston** (1969) notó que el ancho aumenta rápidamente aguas abajo en pequeños cauces, mientras que un ajuste de la profundidad prevalece en grandes ríos; y **Henderson** (1961) sostiene que una relación de raíz cuadrada sólo se mantiene en ríos con determinada relación pendiente-descarga (o en configuraciones de perfiles muy largos o prolongados). De hecho, **Henderson** (1961) desarrolló la relación multiparamétrica:

$$P = 1571 Q_b S_b^{1.17} D_{50}^{-1.5}$$

en la cual el perímetro mojado **P** se incrementa con la potencia de la corriente, representada por el producto de la descarga y la pendiente, en lugar de estar solamente relacionada a la descarga, y decrece con el tamaño medio del sedimento.

Uno de los pocos estudios que reiteran que la interacción Potencia y Resistencia es un factor determinante en la forma de la sección transversal del cauce son los experimentos de **Wolman** y **Brush** (1961), quienes enfatizaron que la potencia erosiva de la corriente depende de la pendiente y sugieren que la relación de la raíz cuadrada ( $B \propto Q^{0.5}$ ) sólo se mantiene si los materiales de las bancas del río, no varían a lo largo del cauce.

**Leopold** (1953) identificó, para la velocidad, una tendencia a aumentar hacia aguas abajo. Aunque el gradiente del perfil longitudinal normalmente decrece hacia aguas abajo, la velocidad puede aumentar debido al incremento en la eficiencia de la sección transversal (radio hidráulico) y la reducción de la resistencia de grano o superficial debido a la disminución del tamaño del sedimento hacia aguas abajo (por abrasión). Sin embargo, deben ser considerados los caudales de baja magnitud (inferiores al caudal de banca llena).

Para flujos similares al caudal medio anual, y en dirección aguas abajo las arenas del lecho sólo pueden experimentar un transporte limitado, con lechos planos en régimen inferior o formas de fondo de rizos y pequeñas rugosidades de forma. Así, la reducción de la rugosidad en dirección aguas abajo está bien definida, y la velocidad se incrementa. Para un flujo más extremo, el lecho de arena perdura, las dunas se desarrollan y la rugosidad debida a las formas de fondo se incrementa. La reducción de la rugosidad aguas abajo es menos marcada por consiguiente, y la velocidad es aproximadamente constante. La **Tabla 9** muestra dos tipos de exponentes que ilustran que la velocidad es aproximadamente constante hacia aguas abajo a nivel de banca llena, considerando que se incrementa para flujos inferiores al de banca llena.

Ambos ejemplos presentados en la **Tabla 9** son para canales trapezoidales con bancas de material cohesivo y material grueso del lecho, se puede deducir que pueden presentarse diferentes patrones de comportamiento en cauces con distintas tendencias sedimentológicas. La velocidad de flujo hacia aguas abajo tiende a variar para caudales con distintas frecuencias y entre ríos de acuerdo con los sedimentos del lecho, los gradientes y la rugosidad del canal.

**Tabla 9.** Valores de los exponentes en las ecuaciones de geometría hidráulica de la variación aguas abajo que relacionan el caudal y la rugosidad en los ríos de Norteamérica.

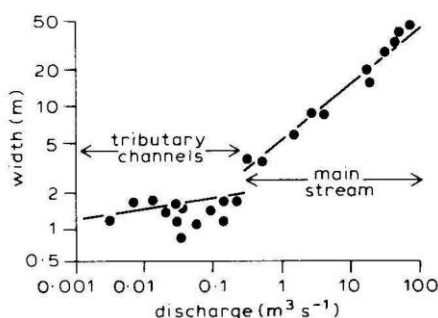
Investigador	Exponente	Q50%	Q15%	Q2%	Qbf	Río
Knighton (1974)	$f$	0.38	0.23	0.08	-	Bollin-Dean, Chesire
Wolman (1955)	$f$	0.32	0.32	0.17	0.05	Brandwine Creek, Pennsylvania
Wolman (1955)	$f$	-0.4	-0.51	-0.32	-0.28	Brandwine Creek, Pennsylvania

**Mackin** (1963) encontró que distintos subsistemas con grandes áreas de drenaje pueden mostrar incrementos, reducciones o regularidad en la velocidad, dependiendo de esas influencias y **Carlston** (1969) argumentó que el exponente más frecuente de la velocidad es cero. En cauces efímeros, un incremento más rápido hacia aguas abajo se presenta tanto en la velocidad como en la relación ancho/profundidad, lo cual al parecer representa un ajuste del flujo y de la geometría del canal, optimizando las condiciones para la continuidad del transporte de carga de fondo de arenas en cauces caracterizados por una reducción más lenta hacia aguas abajo del gradiente del perfil longitudinal. Tal respuesta sistemática del conjunto de exponentes a controles físicos no puede ser ajustada por la teoría de la varianza mínima, la cual predice una única y modal geometría hidráulica hacia aguas abajo que difícilmente se ajusta a cauces perennes pero no a los efímeros, corrientes:  $b = 0.55$ ,  $d = 0.36$ ,  $f = 0.09$ ,  $z = -0.74$ ,  $y = -0.22$  (**Leopold y Langbein**, 1962). Sin embargo, la aplicación de la teoría es cuestionable, por cuanto asume que la pendiente y la rugosidad son variables dependientes cuando realmente son parcialmente independientes. **Smith** (1974) intentó una predicción alternativa basada en una simple ley de transporte de sedimentos y en la ecuación de continuidad. Aunque las bases físicas eran loables, las suposiciones eran dudosas (por ejemplo, incremento lineal de la descarga con el área de la cuenca) y los resultados irreales ( $b = 0.6$ ,  $d = 0.3$ ,  $f = 0.1$ ), especialmente el alto exponente para el ancho.

El concepto de geometría hidráulica hacia aguas abajo en un río tiene varias limitaciones:

1. Las tendencias en esa dirección son complejas debido al cambio de las propiedades en magnitud y frecuencia, con secciones aguas arriba ajustadas a eventos más frecuentes que las de aguas abajo. Pueden surgir tendencias discontinuas si el canal o la geometría del flujo están relacionados a una frecuencia de flujo constante. La **Figura 3** muestra una tendencia compuesta de la relación ancho-descarga para flujos menores a banca llena, tanto para ríos tributarios como para el cauce principal de la cuenca amazónica. Para entender la explicación de la variación del ancho, es necesario ajustar las dos regresiones para el cauce principal y sus tributarios separadamente (**Thornes**, 1970). La discrepancia entre las tendencias en los tributarios y en el cauce principal puede reflejar relaciones de frecuencias de flujo cambiantes, así como un incremento del aporte de arenas a los cauces más pequeños como consecuencia de la deforestación en las cabeceras de la cuenca hidrográfica.

a



**Figura 3.** Relación ancho-caudal aguas abajo en la región Xingua-Araguaia, ilustrando la diferencia de las tendencias entre los ríos tributarios de la cabecera y la corriente principal.

2. Se presentan considerables variaciones sistemáticas en la geometría del canal a escala local, debido a las interrelaciones entre las propiedades de las secciones transversales y las características de la planta y del perfil del cauce. De esta manera, la dispersión de las tendencias generales aguas abajo puede resultar de una selección inconsistente de secciones medidas con respecto al patrón de meandros y las características de las zonas de rápidos y pozos (**Wolman**, 1955). Por tanto, esto puede dificultar la distinción de dispersiones aleatorias reflejando secciones que posiblemente se encuentren en desequilibrio de los efectos sistemáticos relacionados a la variabilidad local.

3. Se debe resaltar el control multiparamétrico de la geometría del canal. Aun en la geometría del flujo en una estación se presenta esto, a pesar de la consistencia de la mayoría de las variables independientes en una sola estación. **Knighton** (1975) obtuvo una correlación mínima de  $R^2$  del 96% en múltiples regresiones prediciendo la velocidad media en secciones a partir de la descarga y el coeficiente de resistencia. En dirección aguas abajo varían los materiales del lecho y orillas, el gradiente del valle, la rugosidad y la vegetación riparia, y los ajustes de la geometría del canal deben ser interpretados en relación a esos controles multiparamétricos. **Mackin** (1963) estudió las tendencias de la velocidad aguas abajo identificando distintas relaciones para diferentes subsistemas fluviales, reflejando los efectos de las variables independientes no medidas.

Por último, una de las consideraciones que se tiene en cuenta para la utilización de la geometría hidráulica hacia aguas abajo es que para hacer que las relaciones regionales sean de una aplicación en los campos de la hidráulica fluvial y la ingeniería de ríos; el caudal a banca llena y la geometría de la sección transversal, se deben relacionar y expresar en función del área de drenaje (para ejemplos, véase: McCandless y Everett, 2002; Harman y otros, 2001; Harman). En particular, la relación del ancho del canal de cauce lleno con el área de drenaje es una herramienta de evaluación muy utilizada, debido a que el ancho se puede medir fácilmente en el campo, o se puede determinar gráficamente, si se dispone de la geometría de la sección transversal del cauce (incluidas las bancas). Del mismo modo, el área de drenaje se puede obtener comúnmente a partir del uso de mapas topográficos o de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

## 2. ANTECEDENTES

En la literatura científica del país se encuentran relaciones de geometría hidráulica en estación obtenidas en diferentes ríos, pero son muy pocos los que presentan resultados de relaciones que involucren caudales a banca llena o caudales dominantes.

Uno de estos ejemplos se encuentra en los resultados del Proyecto de Modelación del río Cauca realizado por la Universidad del Valle para la CVC en el periodo 1997-2007. En este estudio se presentan las relaciones de geometría hidráulica en estación, mediante expresiones de tipo potencial para cada estación hidrométrica.

Sin embargo, el río Cauca ha sido escenario de estudio desde épocas anteriores, como lo muestra el Estudio Morfológico del Río Cauca (1981), en el cual se implementó un modelo morfológico con el fin estimar las posibles variaciones en los niveles del fondo del río debido a la construcción y puesta en operación del embalse de Salvajina.

La Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (Posada, 2002), realizó un estudio en cual se reportan algunas de las ecuaciones tipo Geometría Hidráulica desarrolladas para corrientes en régimen de la zona montañosa del noroccidente de Colombia. Para el cálculo de las ecuaciones del régimen en la zona montañosa del noroccidente del país emplearon un enfoque básicamente empírico con datos de campo de 29 corrientes aluviales, teniendo en cuenta las características para el nivel de banca llena. En este estudio se encontró que las ecuaciones para el ancho y la profundidad hidráulica de los cauces en la zona montañosa son similares (en cuanto a los exponentes) a los encontrados por Leopold hace casi medio siglo; para la velocidad se halló un exponente igual al propuesto por Pettis en 1953 para los ríos de La Florida; para el área de la sección transversal de los cauces se presenta adicionalmente una ecuación tipo régimen, deducida para las corrientes de montaña.

En el estudio “Relaciones de Escala entre el Transporte de Sedimentos en Suspensión y Las Características Morfoclimáticas de Cuencas Colombianas” de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (Zuluaga y Poveda, 2002), se obtuvieron relaciones de geometría hidráulica del caudal medio anual y la carga sólida suspendida media anual y el área de drenaje de 179 estaciones en toda Colombia. En este estudio se identificaron 13 regiones climáticas: Atrato, Caribe, Guajira, Magdalena Alto, Magdalena Medio, Sogamoso, Cauca Alto, Cañón del Cauca, Nechí, Catatumbo, Orinoquía, Amazonía y Pacífico. También se determinaron las leyes potenciales entre el caudal medio mensual y el caudal sólido medio mensual para 11 estaciones de la CVC. Presentan una relación entre la producción de sedimentos y la precipitación media anual, similar a lo encontrado por Langbein y Schumm (1958), para estimar la producción de sedimentos, tratando de relacionar la climatología con este proceso.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Cuando se requiere realizar una intervención en un río para un objetivo específico es necesario estimar las posibles respuestas del río, con el fin de determinar y evaluar todos los posibles efectos hidráulicos, morfológicos y ambientales, para de esta manera seleccionar la alternativa que origine los mayores beneficios y los menores daños al sistema fluvial y su entorno.

El río Cauca viene experimentando, desde hace muchos años, un proceso de degradación debido especialmente a las actividades antrópicas, tales como: descarga al río de todo tipo de desechos tanto sólidos como líquidos; la sobreexplotación mecánica y manual, de forma indiscriminada de los materiales del lecho, los cuales son usados en construcción; la construcción de obras hidráulicas concebidas sin el menor conocimiento del río y sus posibles respuestas; la agricultura que se realiza hasta la misma banca del río, y el manejo en general que se le da a la cuenca. El río ante estas acciones origina o desencadena unas respuestas que se refleja en la variación de las características hidráulicas y morfológicas. Aunque en años anteriores se ha realizado una geometría hidráulica del río Cauca en su valle alto, resulta necesaria una actualización y complementación de la misma con el fin de disponer de una fuente de información confiable y representativa de las condiciones y características existentes en el río y que pueda ser utilizada en los estudios y proyectos que lo requieran.

El propósito de este estudio es identificar las características de las relaciones de geometría hidráulica en el río Cauca, y presentar métodos de estimación de la descarga en sitios donde no existen estaciones hidrométricas usando las características del cauce y de la cuenca por medio de las relaciones de geometría hidráulica regional. Esto se hace con el objetivo de contar con una herramienta para planificación, gestión y ordenamiento del río Cauca en cuanto a su restauración y el diseño de estructuras hidráulicas con fines de protección contra inundación o erosión.

#### **3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál es la geometría hidráulica del cauce del río Cauca en su valle alto (tramo Salvajina – la Virginia) para diferentes caudales característicos?



#### 4. JUSTIFICACIÓN

Cuando se efectúa una modificación o una intervención en un tramo de un río aluvial muy frecuentemente se originan cambios en las características de su cauce, tanto localmente como aguas arriba y aguas abajo del sitio en consideración. Tales cambios pueden ocurrir muy lentamente o por el contrario extremadamente rápido y pueden propagarse a grandes distancias del sitio intervenido.

Predecir o estimar la respuesta hidráulica de un río a estas modificaciones (naturales o artificiales) es una tarea bastante compleja, debido al gran número de parámetros y variables involucrados, todos ellos interrelacionados; así por ejemplo un cambio generado en la geometría del cauce origina cambios en la velocidad de la corriente, modificando el transporte de sedimentos lo cual causa un cambio en la geometría del cauce. Los diferentes parámetros son relacionados matemáticamente por medio de expresiones o formulaciones de carácter eminentemente empíricas. Los principales factores que afectan y determinan el comportamiento y la morfología de un río aluvial son: el caudal, la carga de sedimentos, la pendiente longitudinal, la resistencia del lecho y las orillas a la acción del flujo, la vegetación, la geología (incluidos los tipos de sedimentos) y las obras construidas por el hombre. La geometría del canal, la rugosidad del cauce y las formas del lecho pueden variar con el cambio de los caudales y de las cargas de sedimentos.

En concordancia con lo anterior se valida la necesidad de la actualización de la geometría hidráulica del río Cauca para el tramo operado por la CVC y de esa manera tener menos incertidumbre en la realización herramientas planificación y desarrollo de la cuenca así como de obras hidráulicas en el río, y de esa forma tener mayor capacidad para mitigar vicisitudes que puedan suceder ya que producen en ocasiones grandes pérdidas en la región.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

- Determinar las relaciones de geometría hidráulica para el río Cauca en su valle alto a lo largo del tamo Salvajina- La Virginia.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar las características hidráulicas, hidrológicas, geomorfológicas y sedimentológicas del río.
- Determinar el caudal de banca llena, el caudal dominante y sus respectivos períodos de retorno.
- Seleccionar el tipo de modelo de geometría hidráulica y determinar la geometría hidráulica en las diferentes estaciones hidrométricas y hacia aguas abajo.
- Analizar y comparar las relaciones potenciales obtenidas para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

## **6. METODOLOGÍA**

### **6.1 TIPO DE ESTUDIO:**

La presente investigación es de tipo cuantitativa aplicada, y se desarrolla a cabalidad siguiendo las siguientes fases:

### **6.2 FASE 1: CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA, HIDROLÓGICA Y MORFOLÓGICA DEL RÍO CAUCA**

- Consulta de la información existente en los proyectos realizados en años anteriores por la Universidad del Valle mediante el grupo de investigación en Hidráulica Fluvial y Marítima (HIDROMAR), y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca sobre la corriente del río Cauca, consistente aforos sólidos y líquidos disponibles para cada estaciones hidrométrica, información hidrológica sobre caudales y curvas de duración diarias, resultados obtenidos de las curvas de calibración de cada estación hidrométrica, levantamientos topográficos de cada sección transversal, mapas del río Cauca en su valle alto, y datos acerca de la caracterización del río Cauca realizados por el Proyecto de Modelación del Cauca.
- Selección del tipo de modelo de geometría hidráulica a utilizar.
- Organización de la información seleccionada para el estudio, separación de las series de datos para los períodos Pre-Salvajina y Post- Salvajina.
- Caracterización de las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca.

### **6.3 FASE 2: DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA EN ESTACIÓN.**

- Realización de las gráficas de dispersión entre las variables hidráulicas, geométricas y sedimentológicas (ancho, profundidad hidráulica, velocidad, área mojada, perímetro mojado, radio hidráulico, nivel de agua, número de Froude, Sólidos en suspensión y factor de forma) en función del caudal.
- Obtención de las ecuaciones de regresión para cada dispersión de datos; para la cual se especifican los constantes, exponentes y coeficientes de determinación obtenidos.
- Realización del análisis comparativo de las relaciones locales de geometría hidráulica obtenidas para los períodos Pre- Salvajina, Post Salvajina, y General.
- Análisis de los cocientes entre los valores de los exponentes obtenidos en las relaciones de geometría hidráulica en estación.

### **6.4 FASE 3: DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES REGIONALES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA EL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO.**

- Calculo de los caudales característicos de las secciones transversales del río Cauca.

- Obtención de las ecuaciones de geometría hidráulica regional en función del caudal dominante, caudal a banca llena, área de drenaje.
- Análisis de las ecuaciones regionales obtenidas para el río Cauca en función de los caudales característicos y en función del área de drenaje.
- Análisis de las variaciones de las ecuaciones de geometría hidráulica regional del río Cauca , comparado el cambio de las variables hidráulicas sobre estaciones hidrométricas para caudales de referencia, con una duración del 80% y 20%.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Cauca posee dentro del territorio nacional un lugar que se puede considerar estratégico y privilegiado, ya que en esta zona se ubican los ingenios azucareros, y la mayor parte de la zona cafetera del país, además de poseer partes del desarrollo minero y agropecuario de Antioquía y el Bajo Cauca, y una porción característica de la producción manufacturera del occidente de Colombia. Debido a la relevancia de esta cuenca, se han realizado estudios forjados para satisfacer los requerimientos y necesidades de los sectores fabriles, además de favorecer el potencial de producción de energía hidroeléctrica que se puede utilizar con la buena gestión del río. Una de las consideraciones que realza la importancia de esta cuenca es que dentro de ella se encuentran ubicadas dos de las ciudades más pobladas del país, y muchas otras que en los últimos años han adquirido mayor importancia debido al aumento de su población.

El río Cauca nace en el Macizo Colombiano, cerca del Páramo Sotará en el Departamento del Cauca, con ubicación 2° 00' latitud Norte y 76° 34' longitud Oeste, y desemboca en el Brazo de Loba del río Magdalena frente al Municipio de Pinillos, en el Departamento de Bolívar a los 8°55' latitud Norte y 74° 29' longitud Oeste, luego de atravesar gran parte del territorio nacional, encauzado entre las cordilleras Occidental y Central. El río Cauca es el principal afluente del río Magdalena, tiene una longitud total de 1350 kilómetros y una hoya hidrográfica aproximada de 63300 Km<sup>2</sup>, lo cual representa el 5% del área de Colombia. La trayectoria que sigue el río desde su nacimiento hasta la desembocadura se puede subdividir en 4 zonas, las cuales son (ver **Tabla 10**):

1. **El Cauca Alto**, con una longitud de 170 Km que comprende desde su nacimiento en el macizo Colombiano hasta la Población de Timba, con niveles de 4000 a 1000 msnm.
2. **El Valle alto del río Cauca**, tiene aproximadamente 436 kilómetros y llega hasta La Virginia en Risaralda, con un cambio de nivel de 100 metros en su trayecto, más o menos hasta la cota 900 msnm.
3. **El Cauca Medio**, presenta un descenso vertiginoso de 400 Km por medio de cañones estrechos y profundos, desde La Virginia hasta la población de Tarazá en el departamento de Antioquia, ubicada en la cota 90 msnm.
4. **El Cauca Bajo**, Parte donde el río sale de la zona de los cañones y se aproxima paulatinamente a terrenos de bajas pendientes con una longitud estimada de 260 Km, hasta su desembocadura en el río Magdalena.

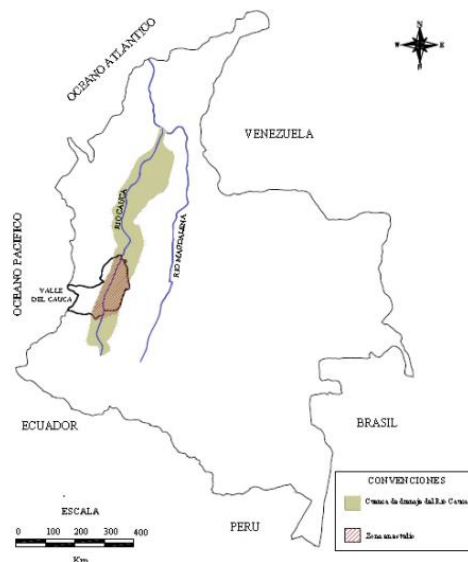
**Tabla 10.** Cuencas Hidrográficas Tributarias del Río Cauca

Zona	Área Parcial (Km <sup>2</sup> )	Área Acumulada (Km <sup>2</sup> )
Alto Cauca	5.451	5.451
Valle Alto del río Cauca	19.349	24.800
Cauca Medio	19.750	44.550
Bajo Cauca	18.750	63.300

## 7.2 TRAMO DE ANÁLISIS (SALVAJINA – LA VIRGINIA)

La zona objeto de estudio para la presente investigación se limita al Valle alto del río Cauca donde el cauce tiene una longitud de 460km, desde el departamento del Cauca, la inclusión de un tramo corto del Cauca Alto en el tramo Salvajina –Timba, hasta La Virginia en el departamento de Risaralda. Cabe resaltar que la zona de interés para este proyecto está bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, CVC.

A su paso por el departamento del Valle del Cauca, el río se recuesta hacia la cordillera Occidental atravesando una llanura que presenta alturas que varían entre 900 y 1000 msnm, los materiales del lecho del cauce están formados primariamente por depósitos aluviales. El Valle alto del río Cauca tiene un área aproximada de 448.000 hectáreas, de los cuales 441.000 son adecuadas para las labores agrícolas, durante las crecientes el río Cauca se desborda inundando extensas zonas de la planicie aluvial.



**Figura 4.** Trayecto de análisis- Valle del cauca

Los tributarios más importantes sobre la margen izquierda del río Cauca son los ríos Timba, río Claro, río Jamundí y Risaralda; en la margen derecha, donde el valle es más amplio, confluyen los ríos Ovejas, Palo, Amaime, Tuluá, Guadalajara, Bugalagrande y La Vieja.

### 7.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CLIMA DE LA ZONA

El clima que presenta el río Cauca en la zona de estudio está definido por los siguientes factores:

- Su posición en la zona de tendencia entre los trópicos.
- La altura y orientación de su relieve.
- El tamaño de su territorio.
- La dinámica de los vientos locales y los vientos alisios.

El Valle Alto del río Cauca tiene una insolación alta debido su posición dentro del globo terráqueo; por ello tiene un clima tropical que se caracteriza por temperaturas relativamente altas y uniformes durante todo el año; por esta razón, no se pueden identificar, como en otras partes del mundo, las estaciones climáticas. Por otro lado, la temperatura con la altura determina diferentes niveles térmicos, ya que en esta zona, en promedio, la temperatura disminuye 1° C por cada 170 m de altura.

Otro rasgo distintivo del clima de esta zona es que se tiene presencia de períodos en donde la pluviosidad se comporta de forma uniforme. Las lluvias y su distribución en el tiempo y espacio son el resultado de su posición respecto al sol, la influencia del relieve y de los vientos alisios. Esta es

una franja de lluvias de relativa intensidad que aumentan o disminuyen de acuerdo con la intensidad de los períodos eólicos.

### **7.2.2 PRECIPITACIÓN**

La mayoría de las lluvias que se presentan en la región del Valle Alto del río Cauca pueden clasificarse de origen convectivo u orográfico, donde existen casos específicos de microclimas. Otra característica importante es que la duración de las lluvias: normalmente entre el 80 y 90 % de las grandes lluvias ocurren en las tres primeras horas de la tormenta, lo que identifica el carácter torrencial de la mayor parte de afluentes del río Cauca en esta zona.

Con respecto a la distribución de las lluvias en el espacio comprendido en la zona de análisis del río Cauca, según los registros que en el año se presentan dos períodos de bajas precipitaciones y dos de altas precipitaciones es por eso que se considera un comportamiento bimodal de la distribución temporal de las lluvias, en donde los meses más secos son (Enero - Febrero y Junio - Septiembre) y los más lluviosos son (Marzo - Mayo y Octubre - Diciembre).

El promedio anual de lluvias en el área varía entre 3800 mm y 800 mm igualmente se destaca la tendencia a ser mayores las lluvias en la zona alta de la cuenca con reducción gradual en la zona del valle. Otra particularidad que se puede señalar es la relacionada con los altos índices pluviales que muestran las cuencas de los ríos Palo, Jamundí y Claro en su parte más alta, con precipitaciones del orden de los 2000 mm anuales; esta condición quizás esté ligada a fenómenos de circulación atmosférica, específicos del área.

### **7.2.3 HIDROLOGÍA**

Con respecto a la hidrología regional se puede decir que el régimen de caudales que el río Cauca y sus más importantes tributarios presentan en el área está directamente ligado al régimen pluvial, presentando dos períodos húmedos entre los meses de Abril - Junio y Octubre - Diciembre y un período seco entre los meses de Julio – Septiembre. Particularmente la mayor parte de los ríos tributarios al río Cauca en esta zona pueden clasificarse como torrentes, de acuerdo con las características fisiográficas y morfométricas de las subcuencas que las subtienden; estas circunstancias implican una respuesta crítica a lluvias cortas e intensas, particularizándose su régimen por caudales relativamente bajos la mayor parte del año, con crecientes de picos bastantes grandes y breve duración.

El régimen de estas corrientes, unido al proceso de deforestación a que están sometidas sus cuencas, han originado procesos de erosión notables que repercuten de alguna manera en la morfología del río Cauca. Contrariamente a sus tributarios, el río Cauca presenta caudales de consideración durante casi todo el año, aunque lógicamente los fenómenos que afectan a los tributarios igualmente distorsionan su régimen.

La construcción y puesta en operación en el año 1985 de la represa de Salvajina varió sustancialmente el régimen de caudales de acuerdo con los objetivos de regulación (control de inundaciones), generación de energía y alivio a la contaminación de sus aguas, presentando principalmente cambios sustanciales en las épocas de estiaje, y en menor medida, en épocas de invierno. En la **Tabla 13** se muestran los caudales máximos, medios y mínimos para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca.

#### 7.2.4 ASPECTOS AMBIENTALES

Las dificultades que se tienen en la zona de estudio desde el punto de vista ambiental pueden sintetizarse en los siguientes aspectos: áreas deterioradas por uso inadecuado del suelo; contaminación de los recursos hídricos por vertimiento de aguas servidas de los centros urbanos, complejos industriales y agropecuarios; la extracción de los materiales del lecho del río; el deterioro del suelo por la explotación minera; la disminución de caudales, procesos de deforestación, la torrencialidad en algunas subcuencas; y, distintos impactos negativos de la actividad humana en su conjunto, como quemas para desmalezar terrenos, construcción de vías, ganadería, agricultura y urbanización acelerada.

#### 7.2.5 CONTAMINACIÓN DEL RÍO CAUCA

Al río Cauca y sus afluentes descargan aguas residuales domésticas de todas las poblaciones ubicadas a lo largo de su recorrido. El crecimiento industrial también contribuye con una alta cuota al deterioro ambiental. Pese a disposiciones legales, las industrias, continúan descargando en los ríos toneladas de basura, aguas negras, desechos industriales y pesticidas residuales. Los efectos de esta contaminación sobre la biota acuática son impresionantes, como lo demuestra la frecuente muerte de peces originada en la zona industrial Cali-Yumbo, sector en donde se encuentra el mayor número de fábricas.

La preocupación por este salto tecnológico y sus consecuencias, ocurrido en el breve lapso de casi dos generaciones, han llevado a las autoridades competentes a estar más conscientes de evaluar los efectos ambientales, en favor de un desarrollo sostenible para la región.

El sector cafetero aporta en época de cosecha 150 Ton/día de DBO5 (demanda bioquímica de oxígeno a 5 días y 20° C). Este aspecto ha merecido especial atención por parte de la CVC, lo cual condujo a la necesidad de trabajar, en forma conjunta con la Federación Nacional de Cafeteros, a través del Comité Departamental de Cafeteros, en alternativas complementarias para reducir el aporte de carga contaminante, consistentes en reducción de flujos en el proceso de beneficio y tratamiento de efluentes mediante plantas simples en cuanto a operación, a través de digestión anaeróbica. El aporte promedio anual es de 53 Ton/día.

Desde 1968 a la fecha la CVC ha venido desarrollando un programa continuo de mediciones de la calidad de las aguas de la cuenca, especialmente en períodos de estiaje del río. El análisis de las muestras tomadas entre Diciembre de 1977 y Mayo de 1978, determinó las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) para las diferentes estaciones en el río Cauca (ver **Tabla 11**). En Abril de 1996 se obtuvo información del deterioro del recurso hídrico como se muestra en la **Tabla 12**.

**Tabla 11:** Oxígeno disuelto en estaciones del río Cauca.

Estación	OD (mg/l)
Salvajina	7.6
La Balsa	6.8
Juanchito	3.9
Puerto Isaacs	2.6
Media Canoa	2.0
Riofrio	2.7
Guayabal	2.6
Anacaro	3.3



**Tabla12:** Deterioro del recurso hídrico.

Sector		Cantidad de DBO5
PRODUCTIVO INDUSTRIAL	Industria papelera	20 Ton/día
	Industria azúcar	49 Ton/día
	Otras industrias	50 Ton/día
PRODUCTIVO AGROPECUARIO	Cafeteros	53 Ton/día
COMERCIAL Y DOMESTICO	Cali	93 Ton/día
	Otros municipios	70 Ton/día
MANEJO RESIDUO SOLIDOS	Cali y municipios vecinos	55 Ton/día

### **7.2.6 EXPLOTACIÓN DE LOS MATERIALES DEL LECHO DEL RÍO CAUCA**

Una actividad que se viene adelantando desde hace mucho tiempo en el río Cauca es la extracción de materiales del lecho (arenas y gravas finas), los cuales se emplean en la construcción, principalmente en la ciudad de Cali.

La explotación de los materiales del lecho del río Cauca tiene grandes repercusiones en la morfología de su lecho, debido a que las zonas de extracción de materiales desequilibran su estado natural, convirtiendo la zona de extracción en trampas de sedimentos, que cambian la dinámica sedimentaria de sus zonas adyacentes, generando específicamente, procesos de erosión del cauce, tanto aguas arriba como aguas debajo de los sitios de explotación.

En el inventario efectuado en Agosto de 1979 se estableció que las dragas ubicadas en el tramo Salvajina – La Virginia tenían una capacidad de extracción total de 1880 m<sup>3</sup>/día aproximadamente, es decir, 564000 m<sup>3</sup>/año, lo que equivale en peso a 1'466400 ton/año.

Adicionalmente, para este mismo tramo, se ubicaron los sitios de extracción manual de material del fondo y se estimaron los respectivos rendimientos. El rendimiento estimado fue de 748 m<sup>3</sup>/día, lo cual representa 97240 m<sup>3</sup>/año, equivalente en peso a 253000 ton/año. La extracción total de materiales ascendió a un volumen de 2628 m<sup>3</sup>/día, equivalentes a 788400 m<sup>3</sup>/año y a 2'050000 ton/año.

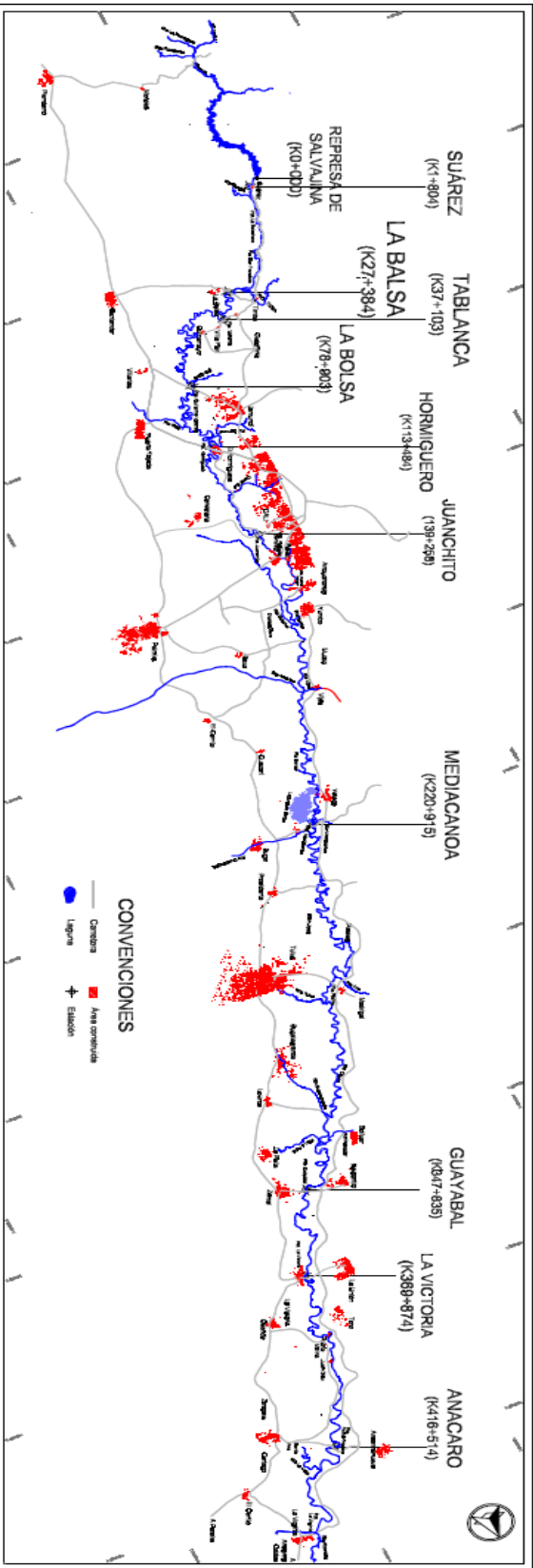
### **7.3 MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN**

La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, como institución encargada del manejo sostenible de los recursos naturales del departamento, efectúa continuamente la medición de las diferentes variables que componen el ciclo hidrológico, de tal manera que los datos recolectados puedan servir para una evaluación permanente de la disponibilidad del recurso hídrico a nivel regional y local dependiendo de las necesidades de planeación de su uso. El río Cauca, a su paso por el Valle Alto o geográfico, cuenta con una red de estaciones hidrométricas que en conjunto han permitido monitorear su comportamiento hidrológico en cuanto a niveles y caudales. Para la elaboración del proyecto y el cálculo de las relaciones de geometría hidráulica se usó dicha información registrada por la CVC en las 10 estaciones hidrométricas descritas en la **Tabla 13:**

**Tabla 13.** Datos generales estaciones hidrométricas operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.

Estación	Código CVC	Coordenadas	Cero de Mira (msnm)	Caudales (m³/s)		Área de Drenaje (Km²)	Inicio de Operación
				Max =			
Suarez	2620000401	Norte: 10429708 m Este: 8183304 m	1015.448	Med=	1070	3653	Enero 10 de 1946
				Mín=	136		
					16		
La Balsa	2610000402	Norte: 833602.63 m Este: 1053296.83 m	980.520	Max =	1360	5111	Enero 01 de 1955
				Med=	190		
				Mín=	18		
Tablanca	2620000415	Norte: 837697.05 m Este: 1055878.81 m	974.400	Max =	853	5147	Enero 01 de 1978
				Med=	192		
				Mín=	20		
La Bolsa	2610000406	Norte: 846167.34 m Este: 1064873.20 m	956.587	Max =	763	6099	Enero 07 de 1967
				Med=	229		
				Mín=	44		
Hormiguero	2620000405	Norte: 856838.96 m Este: 1066683.15 m	948.480	Max =	1054	8069	Enero 01 de 1962
				Med=	263		
				Mín=	38		
Juanchito	2610000401	Norte: 873 368.84 m Este: 1 066 917.95 m	942.570	Max =	1148	8556	Enero 01 de 1934
				Med=	284		
				Mín=	48		
Mediacanoa	2620000407	Norte: 922018.77 m Este: 1080996.74 m	927.290	Max =	1136	12118	Enero 06 de 1965
				Med=	325		
				Mín=	57		
Guayabal	2610000404	Norte: 978834.76 m Este: 1108393.01 m	905.900	Max =	1320	15991	Enero 10 de 1958
				Med=	379		
				Mín=	61		
La Victoria	2610000403	Norte: 992181.11 m Este: 1114739.64 m	907.410	Max =	1324	16296	Enero 10 de 1958
				Med=	388		
				Mín=	63		
Anacaro	2610000405	Norte: 1020810.45 m Este: 1123202.42 m	895.566	Max =	1515	17199	Enero 10 de 1961
				Med=	410		
				Mín=	75		

Las estaciones hidrométricas seleccionadas en este estudio corresponden a las que tienen mayor número de registros disponibles para los períodos de Pre-Salvajina y Post-Salvajina distribuidas en el tramo de estudio (como muestra la **Figura 5**), exceptuando la estación de Suárez que no tiene información suficiente para los análisis Pre-Salvajina, pero igual se incluyó por su ubicación cercana a la represa y también por ser la estación ubicada en el inicio del trayecto de análisis del presente proyecto.



**Figura 5.** Localización de las estaciones hidrométricas operadas por la CVC.

## 7.4 GEOMETRÍA HIDRÁULICA EN LAS ESTACIONES EXISTENTES EN EL RÍO CAUCA

Para el cálculo de las relaciones de geometría hidráulica en cada una de las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca se dispuso primordialmente de los aforos líquidos y sólidos disponibles, así como de los resultados previos que se tenían de estudios realizados en el PMC (2005), para los períodos Pre-Salvajina comprendido entre los años de inicio de operación de cada estación hasta el año de 1984, y el período Post-Salvajina que comprende desde 1985 hasta la fecha; también se tomó un compendio de las series de los registros de caudales y variables hidráulicas por estación a fin de observar las posibles variaciones y efectos sobre el comportamiento del río reflejado en las relaciones potenciales de geometría.

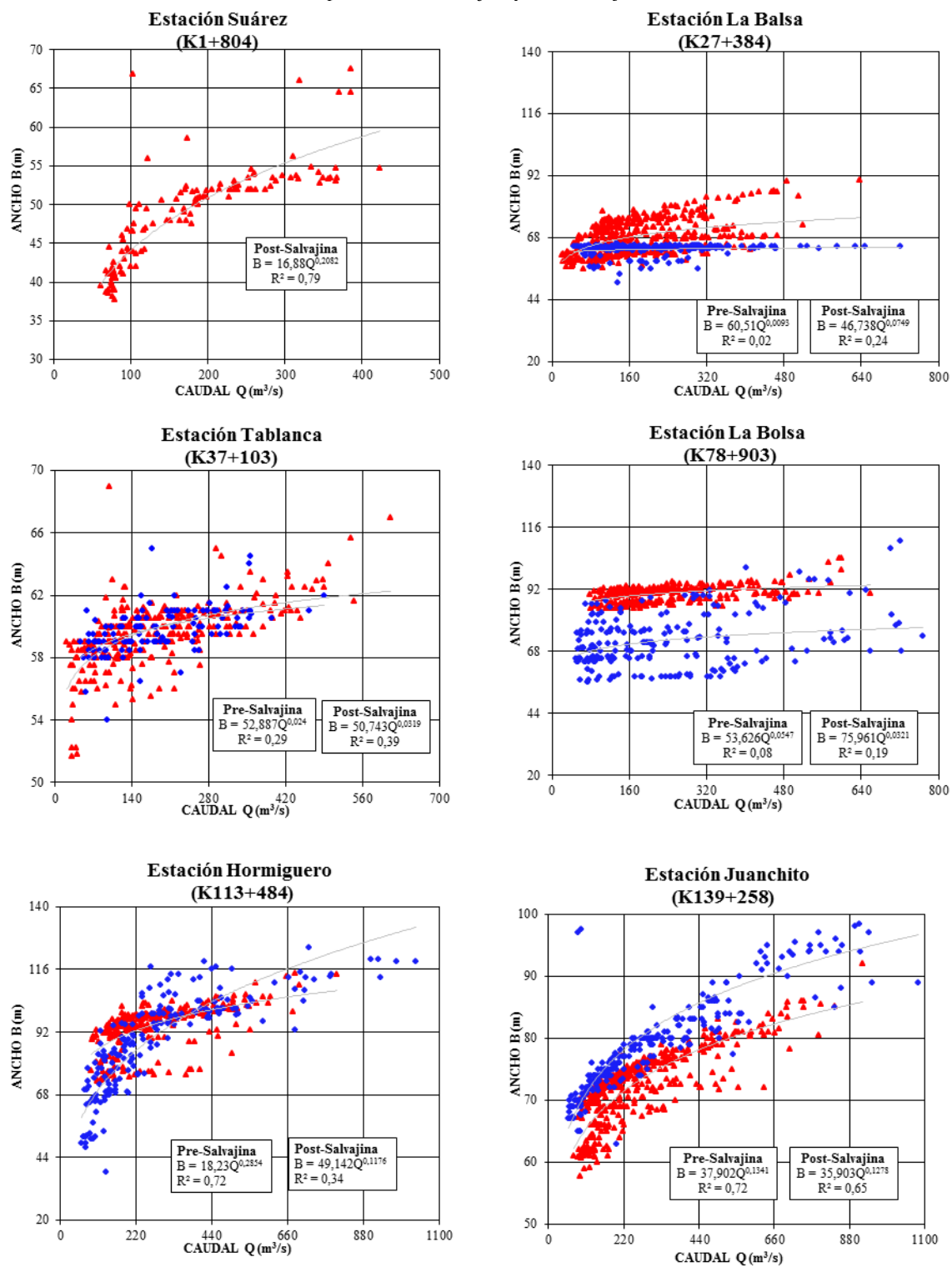
Desde la **Figura 6** hasta la **Figura 15**, se presentan las relaciones de geometría hidráulica obtenidas para las diferentes estaciones hidrométricas del río Cauca, en las cuales se relacionan los caudales con las distintas variables geométricas, hidráulicas y sedimentológicas (ancho, profundidad hidráulica, velocidad, área, sólidos en suspensión, radio hidráulico, perímetro mojado, número de Froude, relación de forma y nivel de agua).

Para realizar las validaciones de los resultados obtenidos con la geometría hidráulica en las estaciones sobre la corriente del río Cauca, se calcula la suma de los exponentes de las variables ancho, velocidad y profundidad hidráulica para cada estación, así como el producto de los coeficientes obtenidos para las relaciones potenciales que relacionan el caudal con dichas variables hidráulicas. Los resultados de dicho proceso se encuentran consignados en las **Tablas 14 y 15**.

Se puede observar en las **Tablas 14 y 15**, que los valores cumplen satisfactoriamente con las condiciones impuestas por la teoría del régimen, dando como resultado que tanto el producto de los coeficientes como la suma de los exponentes dan como resultado la unidad; en algunos casos se acerca por exceso o por defecto a este valor, presentando un porcentaje de error moderadamente bajo.

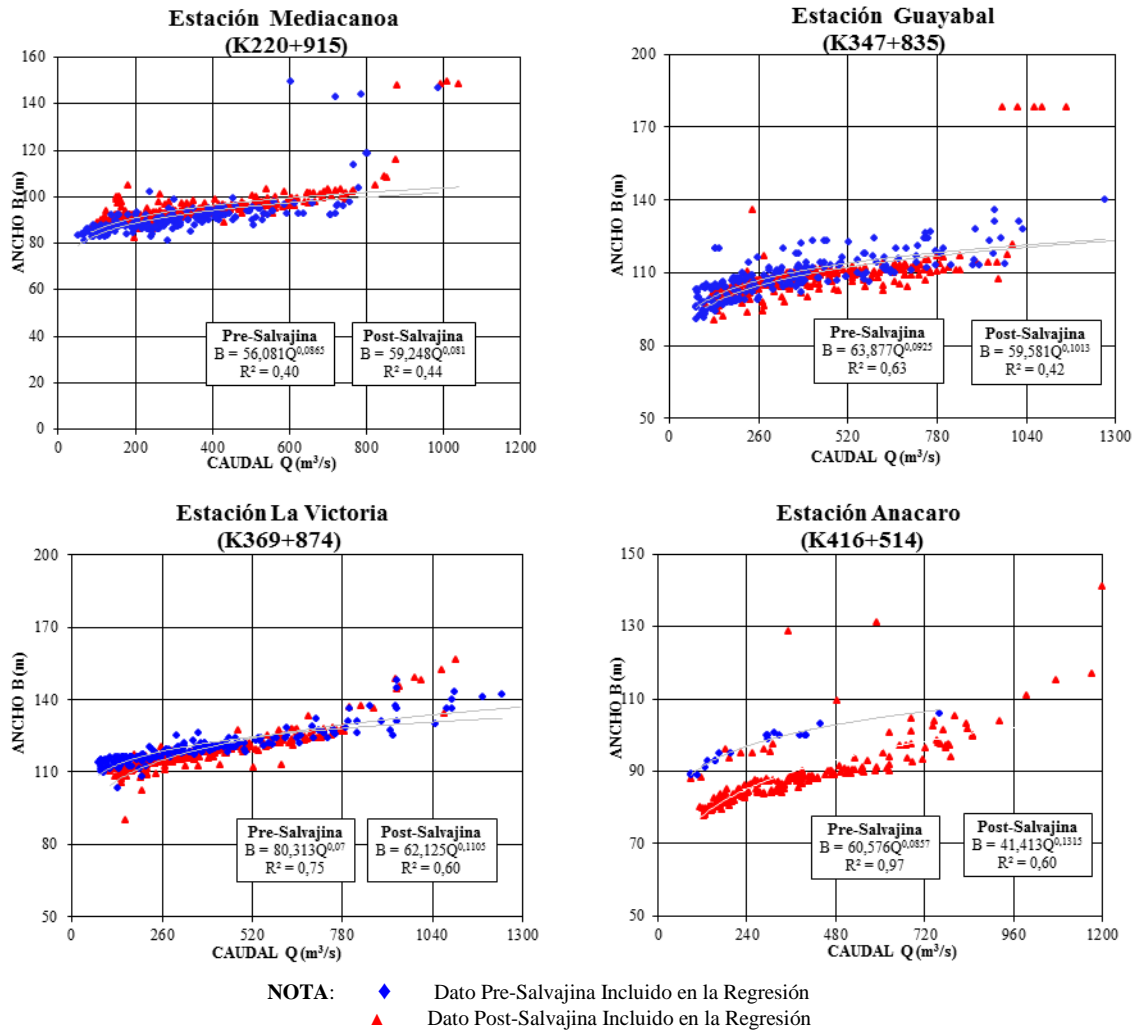
La información sobre los aforos que se encuentra disponible para el cálculo de las relaciones de geometría hidráulica del período Post-Salvajina registradas por la CVC, se encuentra incompleta según la estación de análisis; teniendo así que los períodos después de la construcción del embalse para las estaciones varían entre los 17 años y los 25 años, siendo la estación Tablanca la que posee el período Post-Salvajina con más registros.

**Figura 6:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Ancho para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

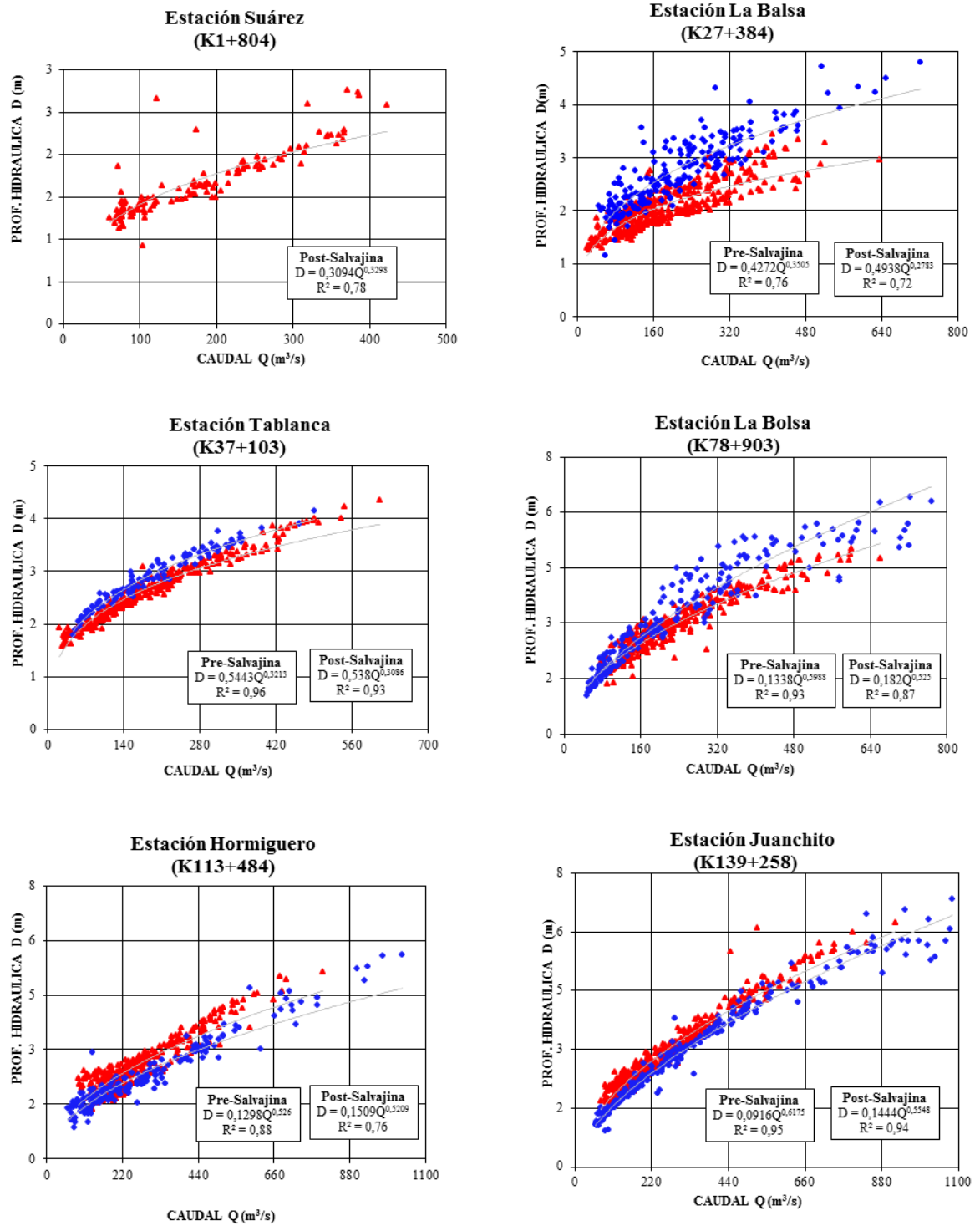


NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 6:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Ancho para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont).

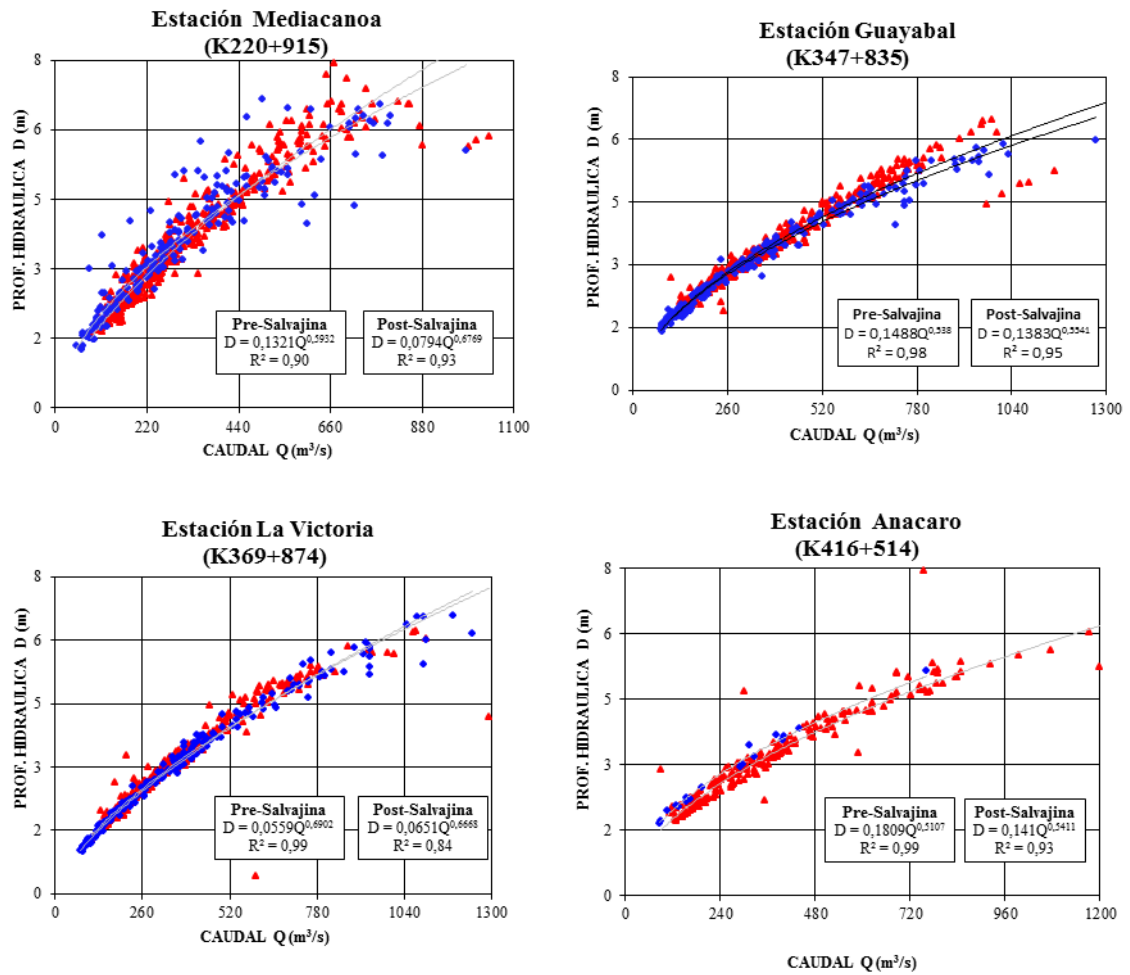


**Figura 7:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Profundidad hidráulica para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.



**NOTA:** ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
 ▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

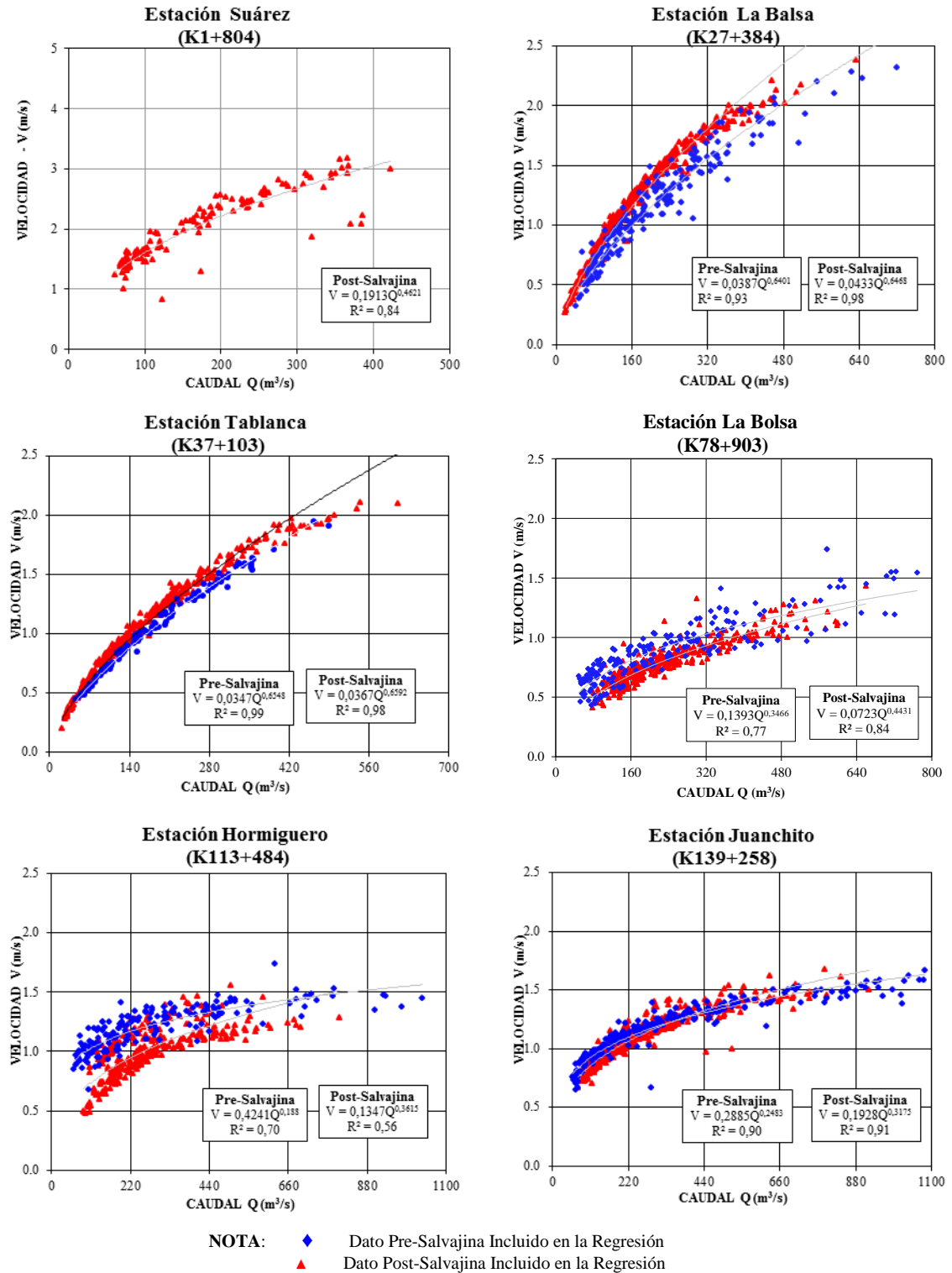
**Figura 7:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Profundidad hidráulica para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont).



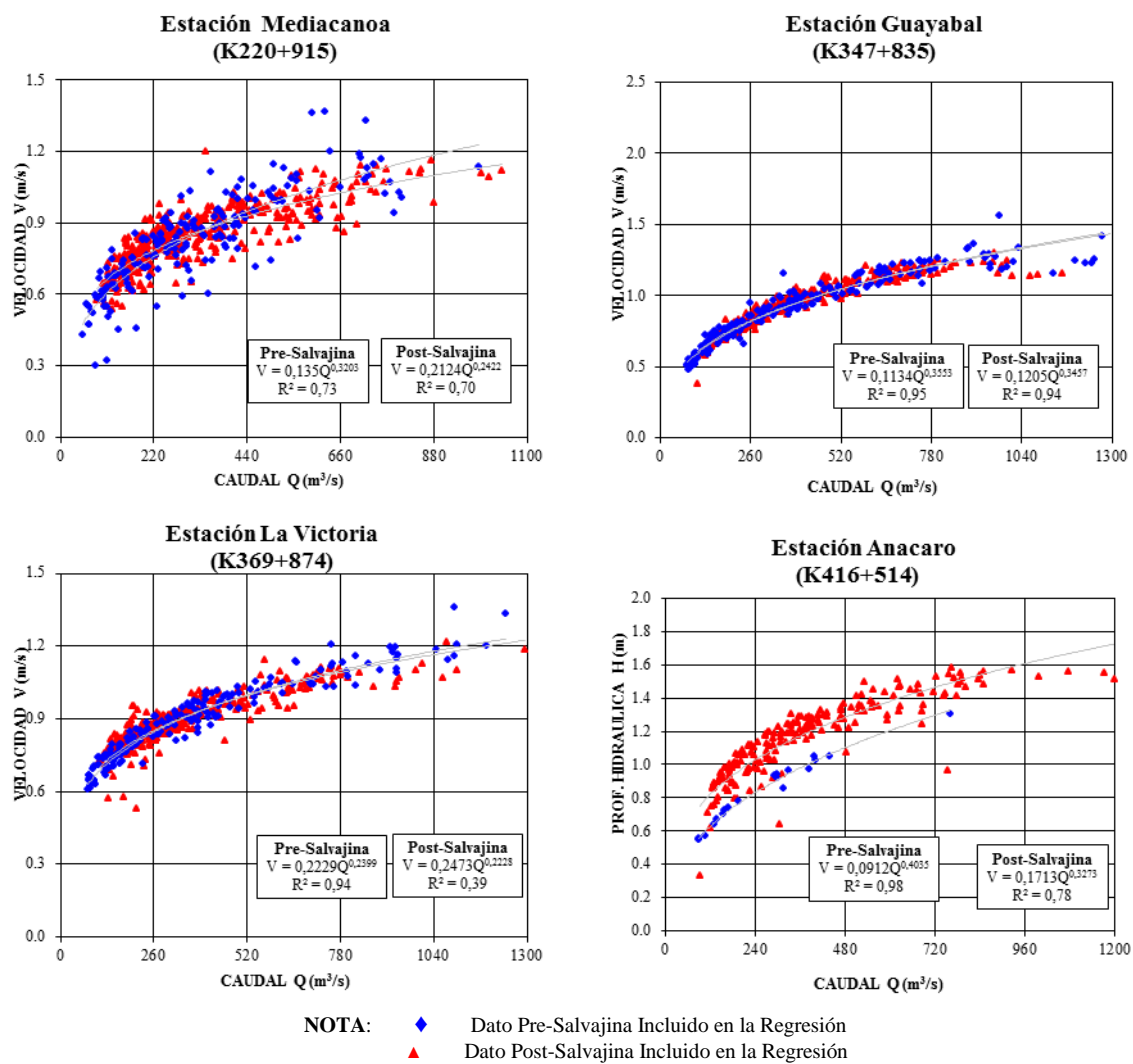
**NOTA:**    ♦    Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
               ▲    Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión



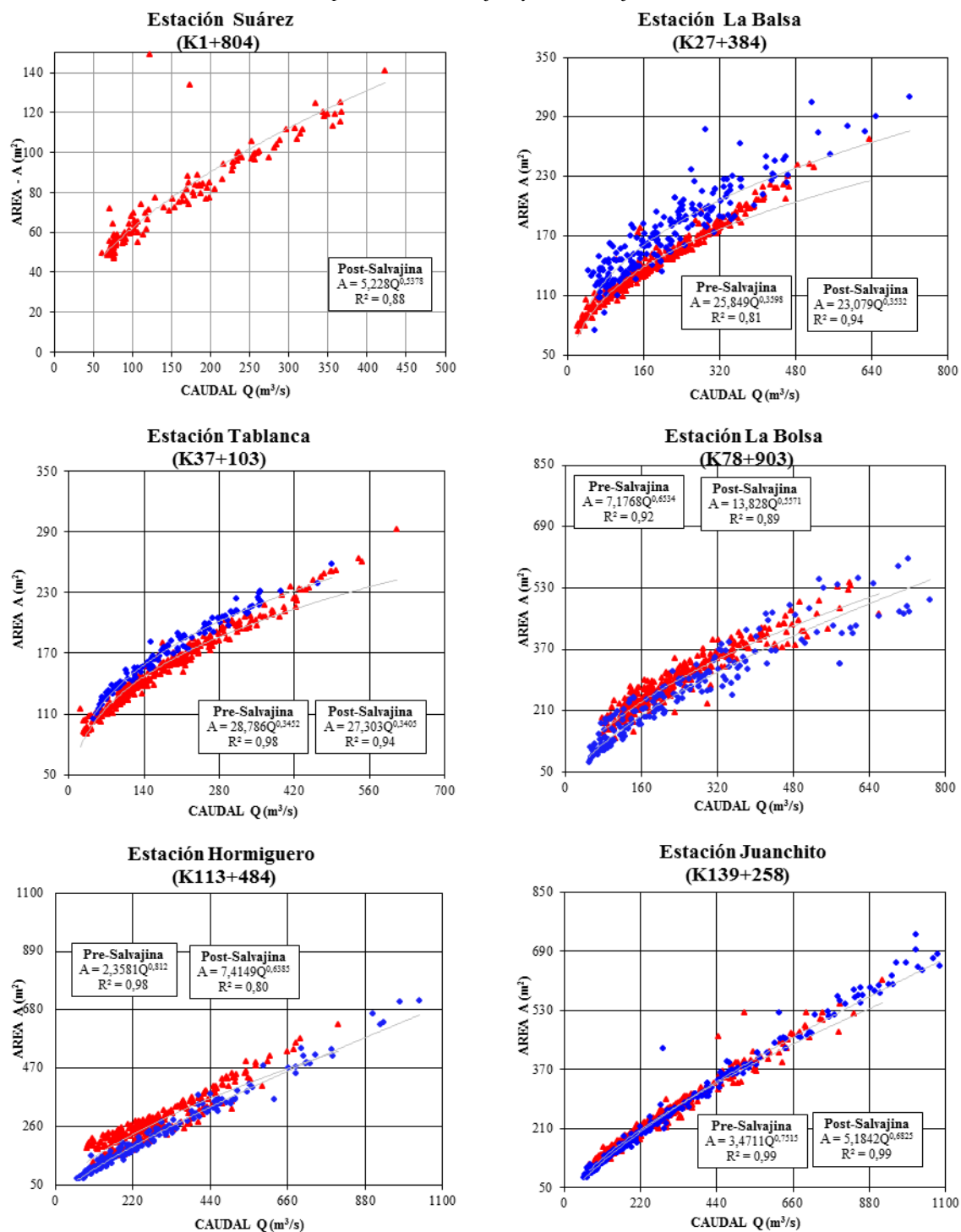
**Figura 8:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Velocidad para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.



**Figura 8:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Velocidad para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).

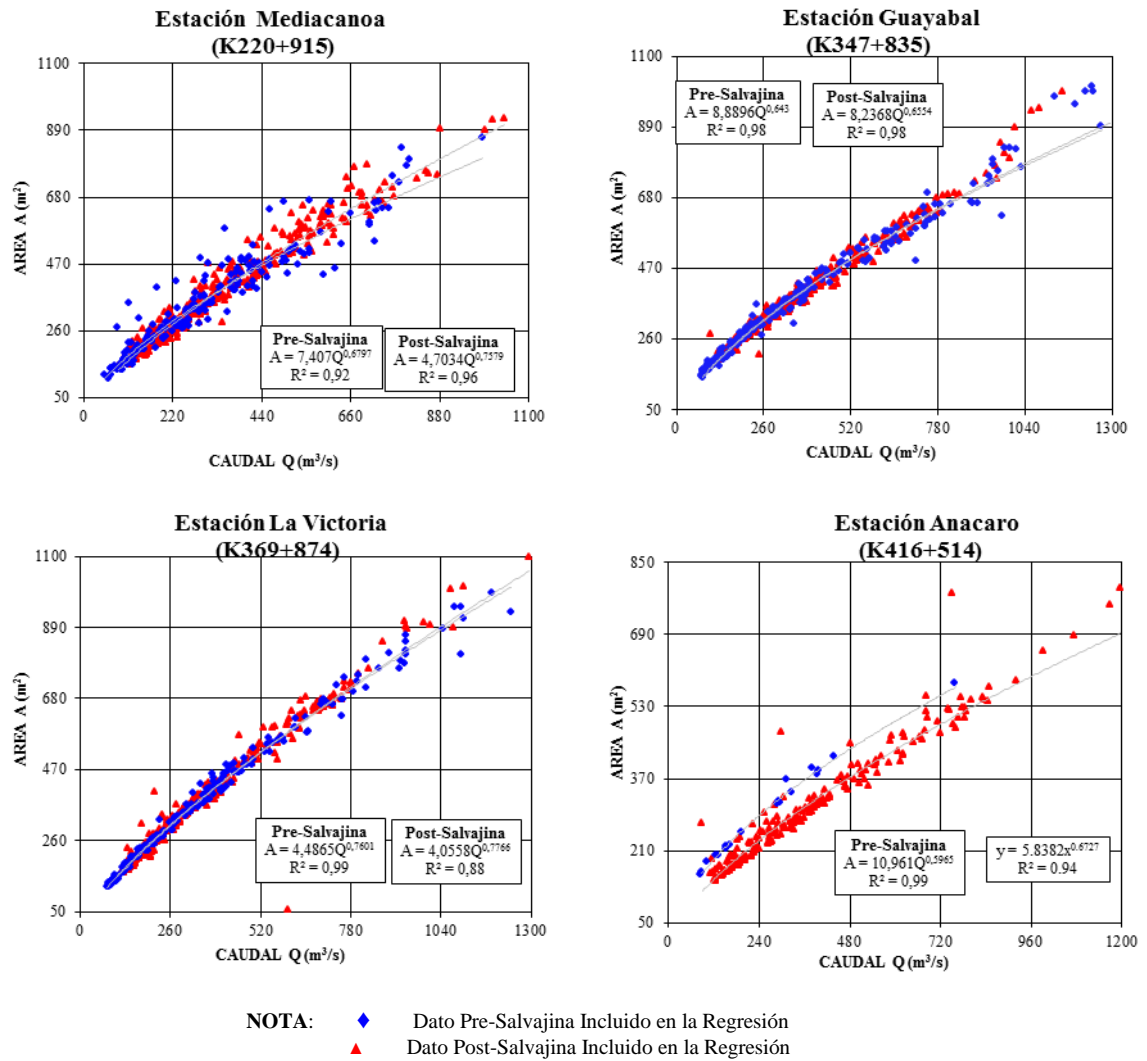


**Figura 9:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Área para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

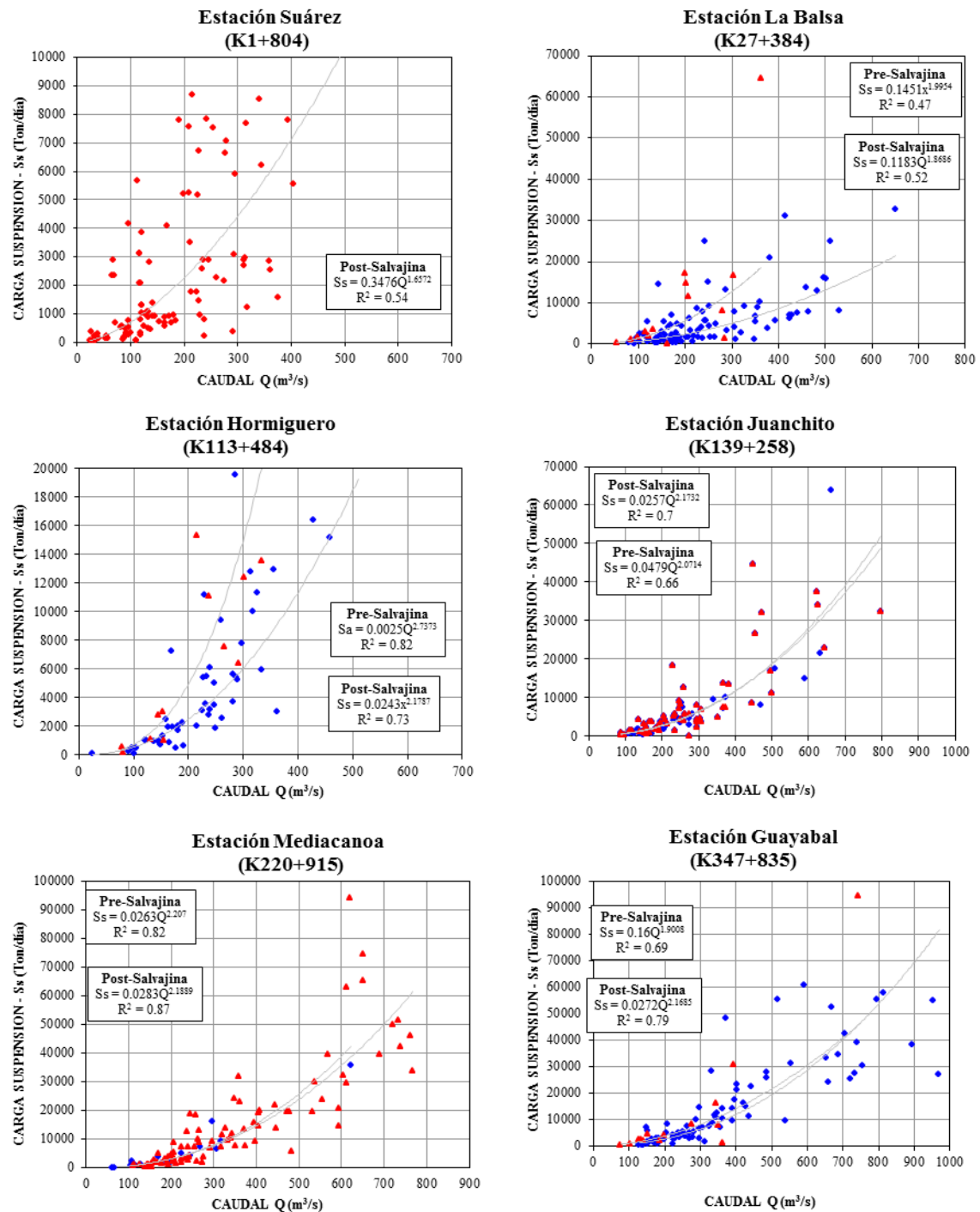


NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 9:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Área para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).

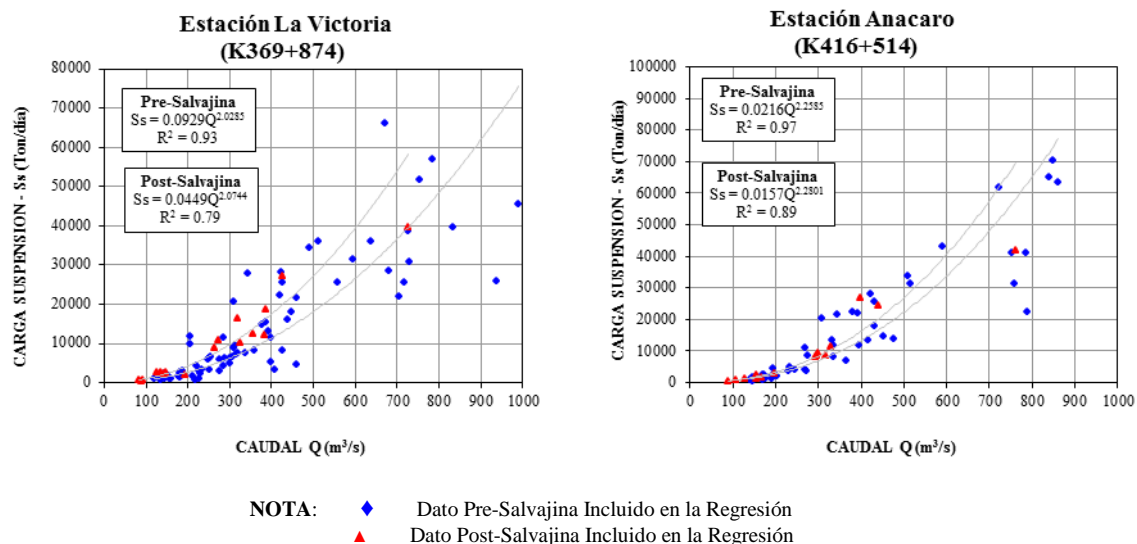


**Figura 10:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Sólidos en Suspensión para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

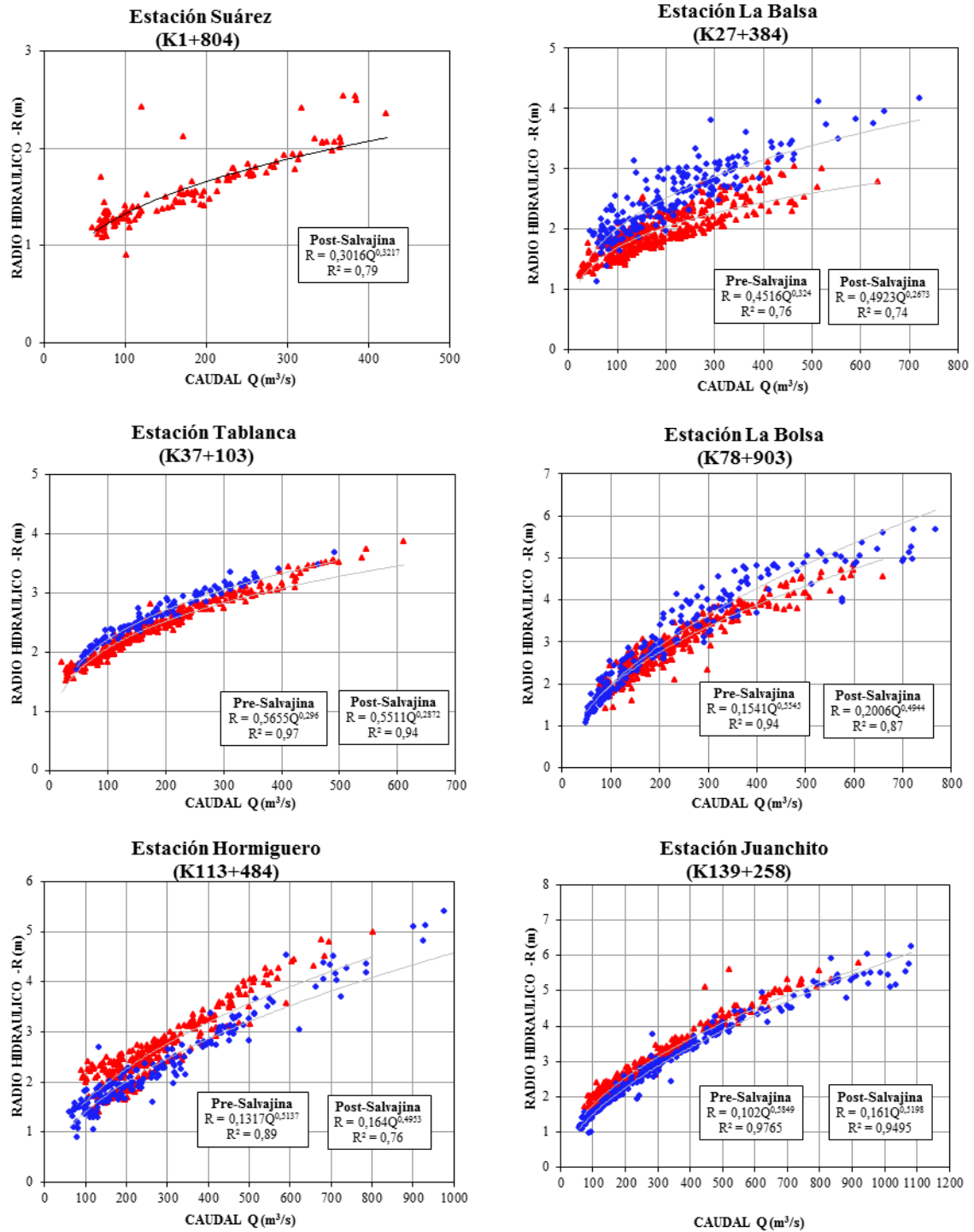


NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 10:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Sólidos en Suspensión para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).

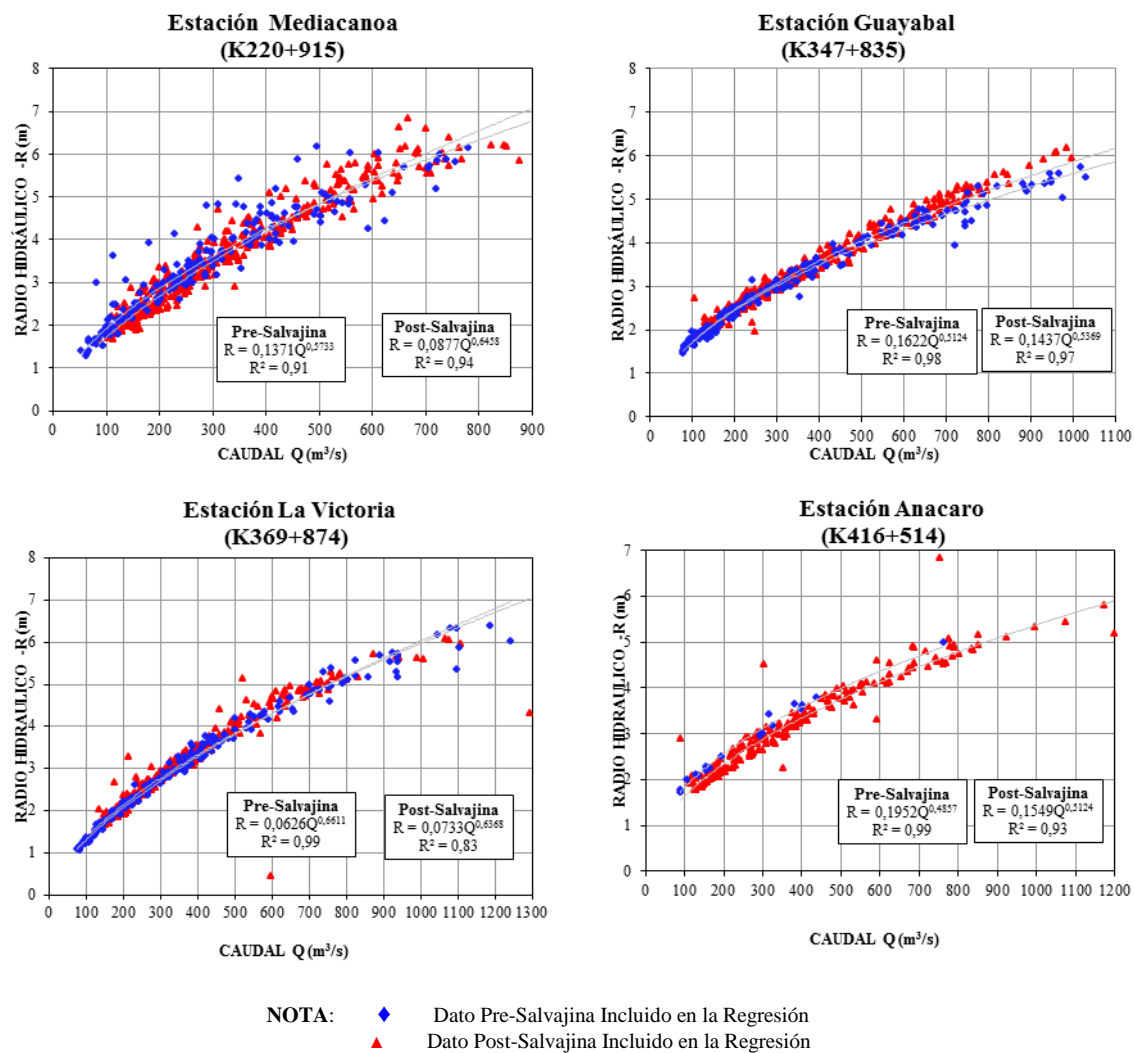


**Figura 11:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Radio hidráulico para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.



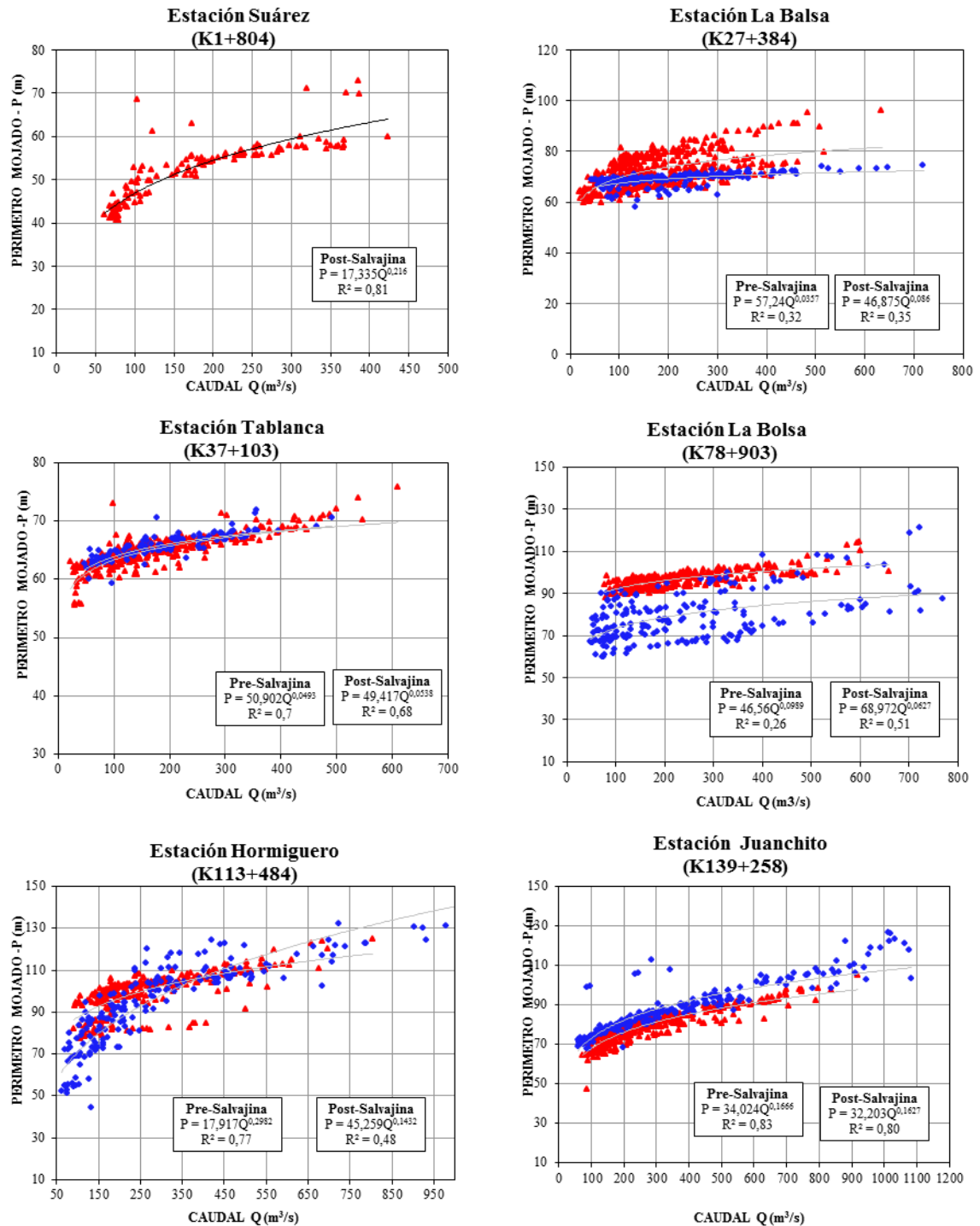
NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 11:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Radio hidráulico para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).



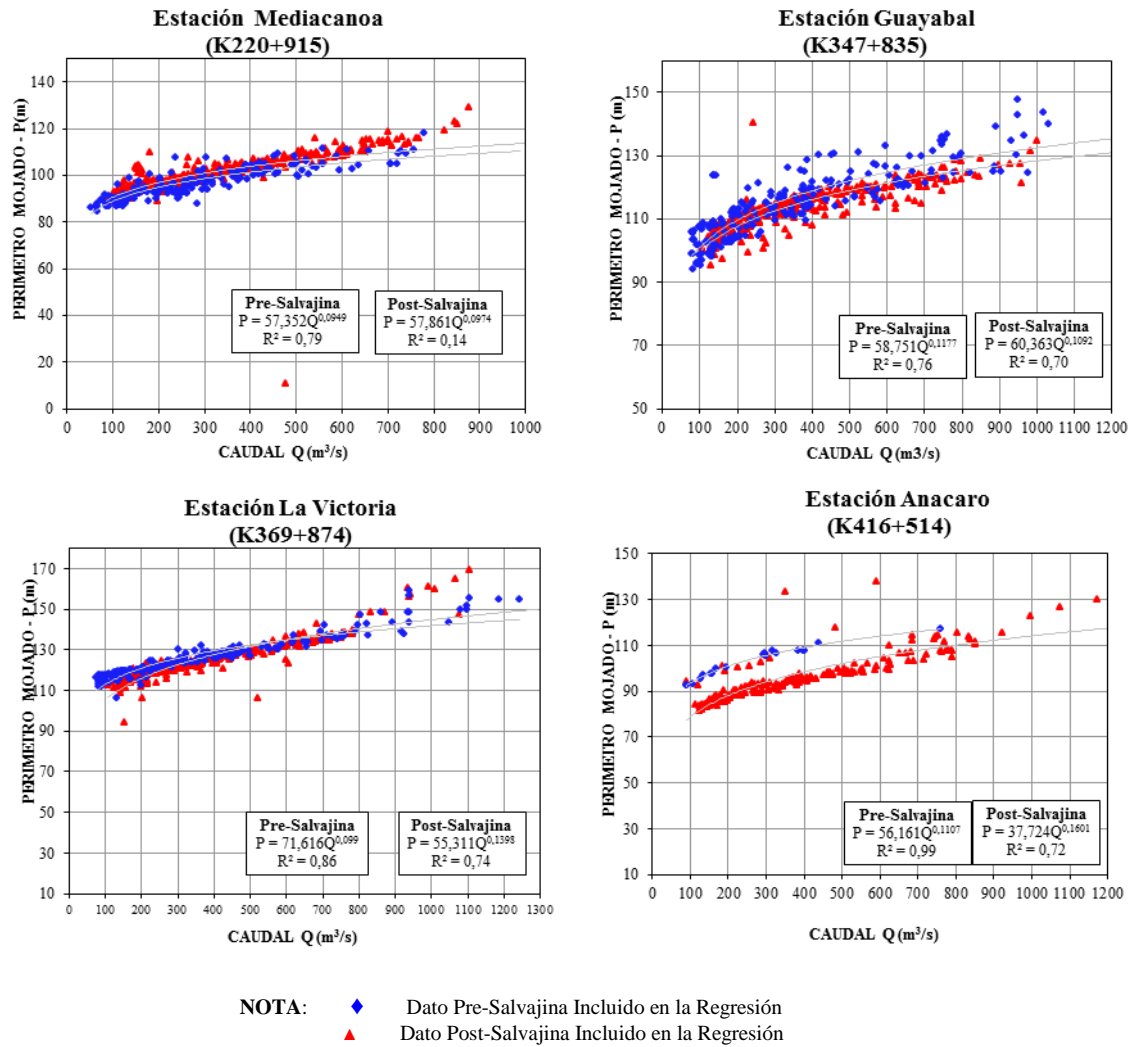


**Figura 12:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Perímetro Mojado para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

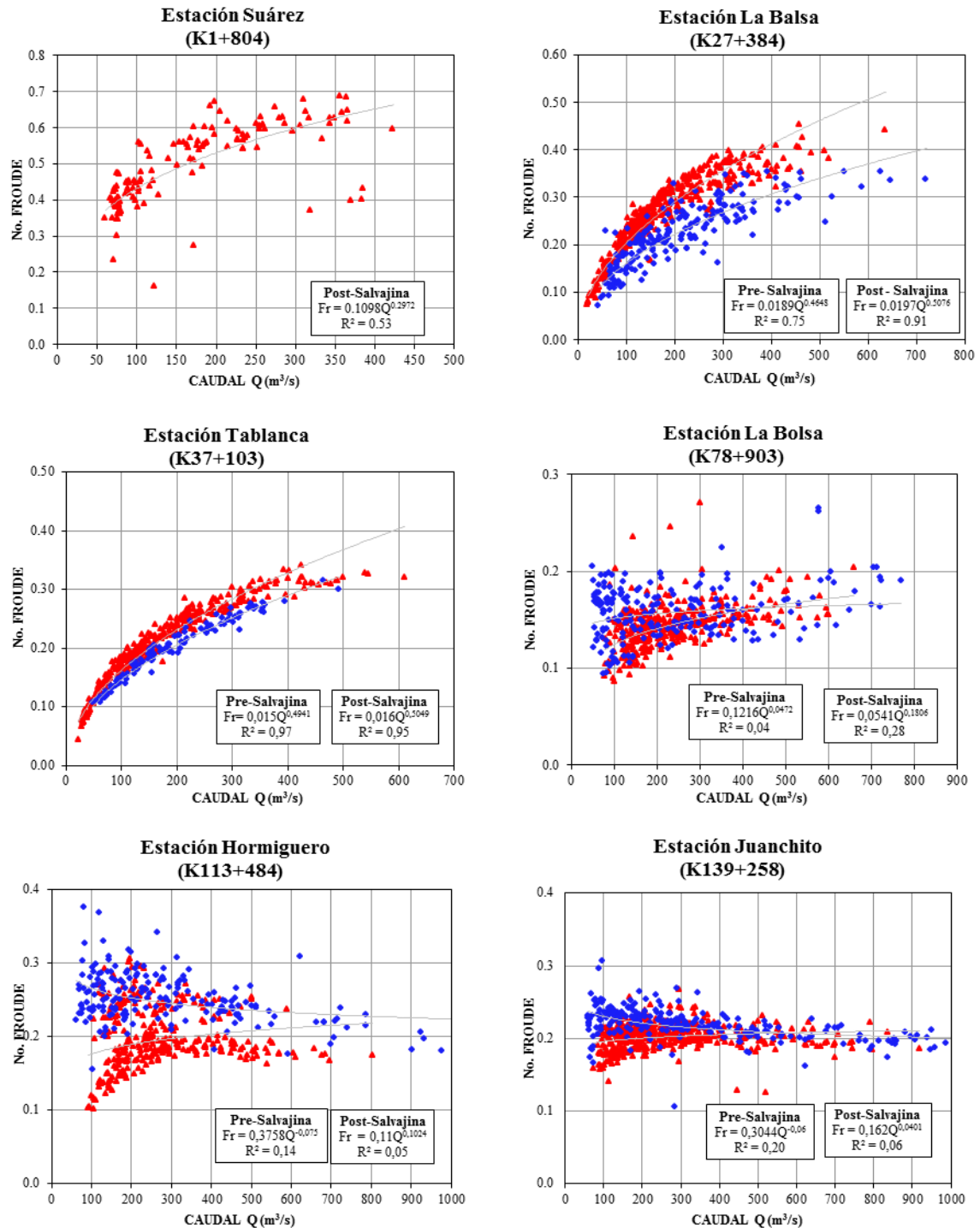


**NOTA:**    ♦    Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
               ▲    Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 12:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Perímetro Mojado para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).

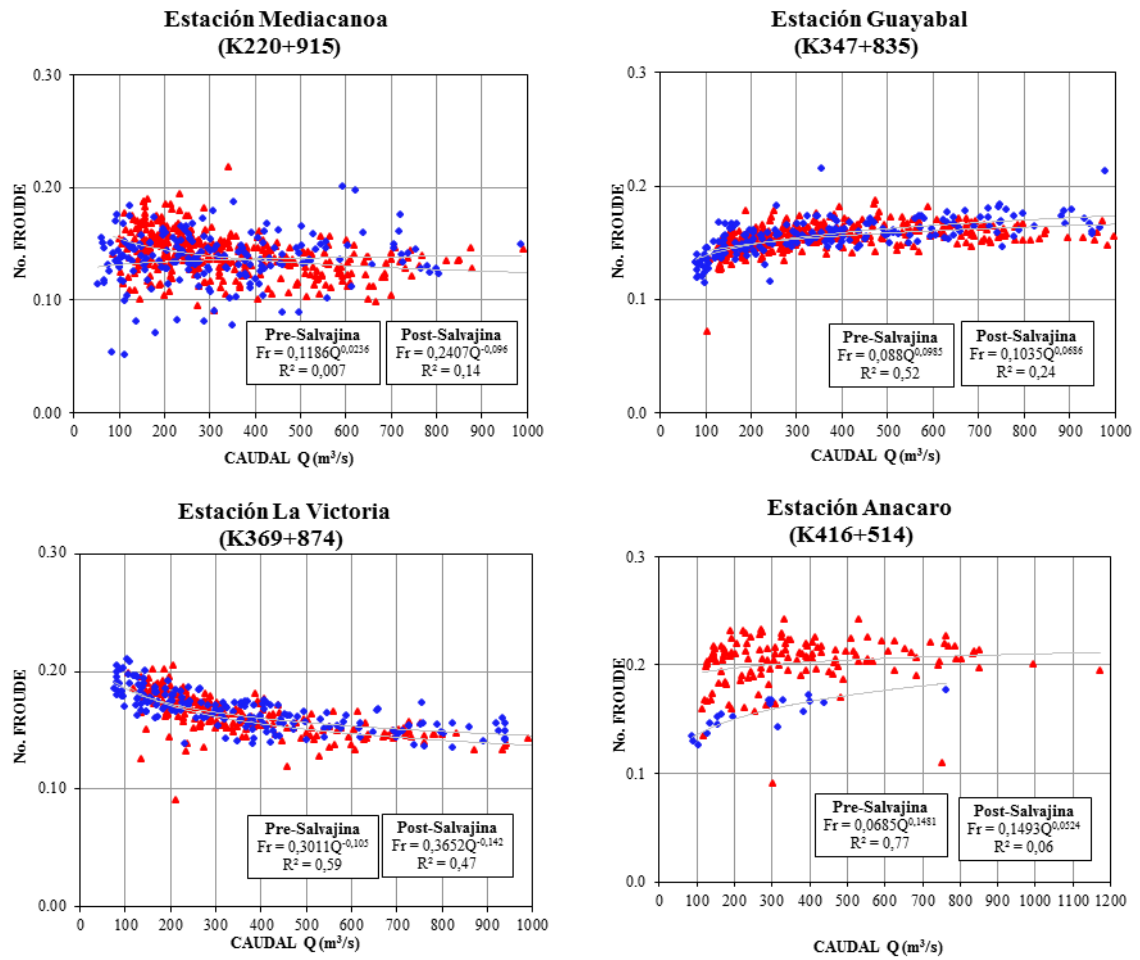


**Figura 13:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Número de Froude para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.



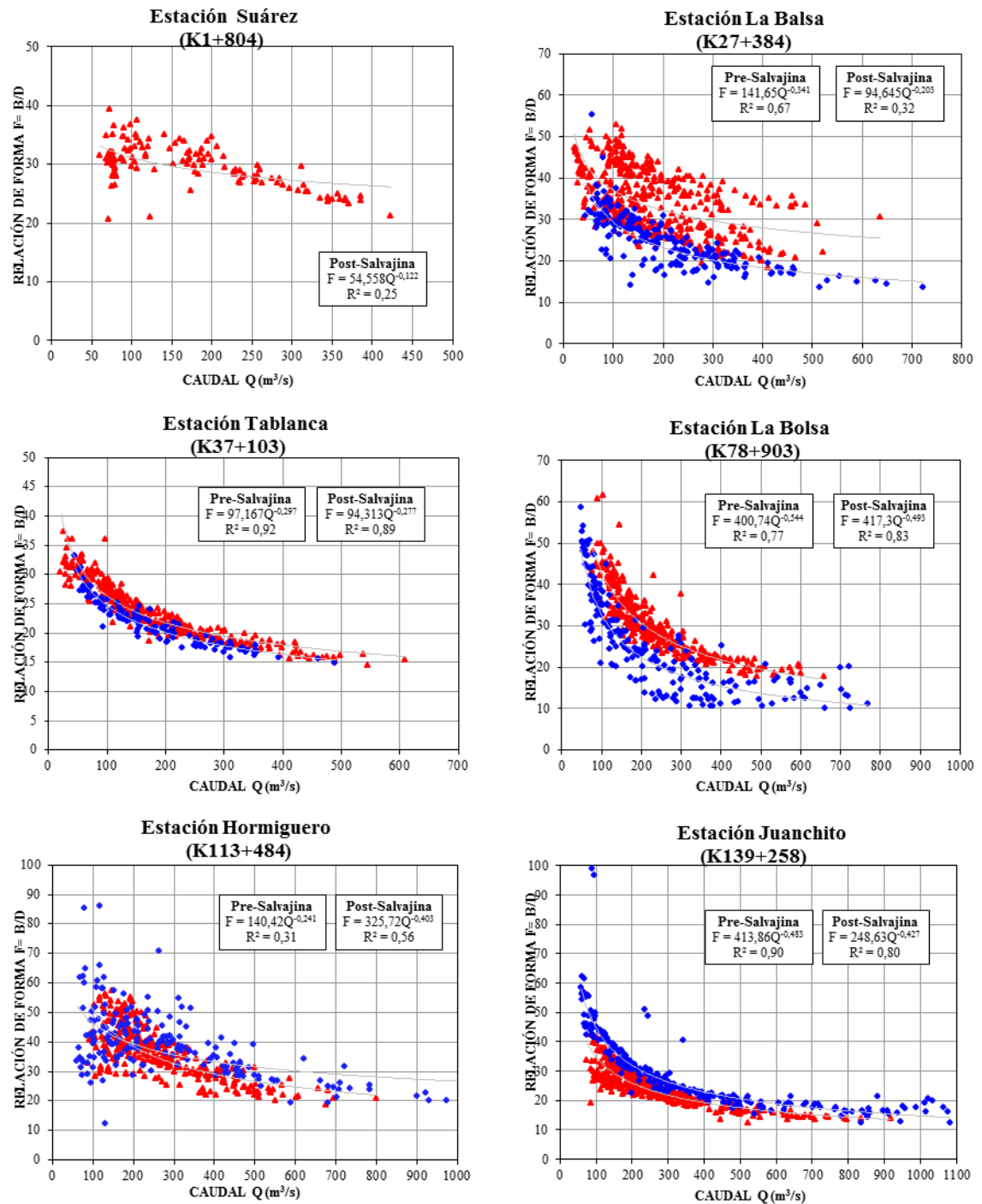
NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 13:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Número de Froude para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).



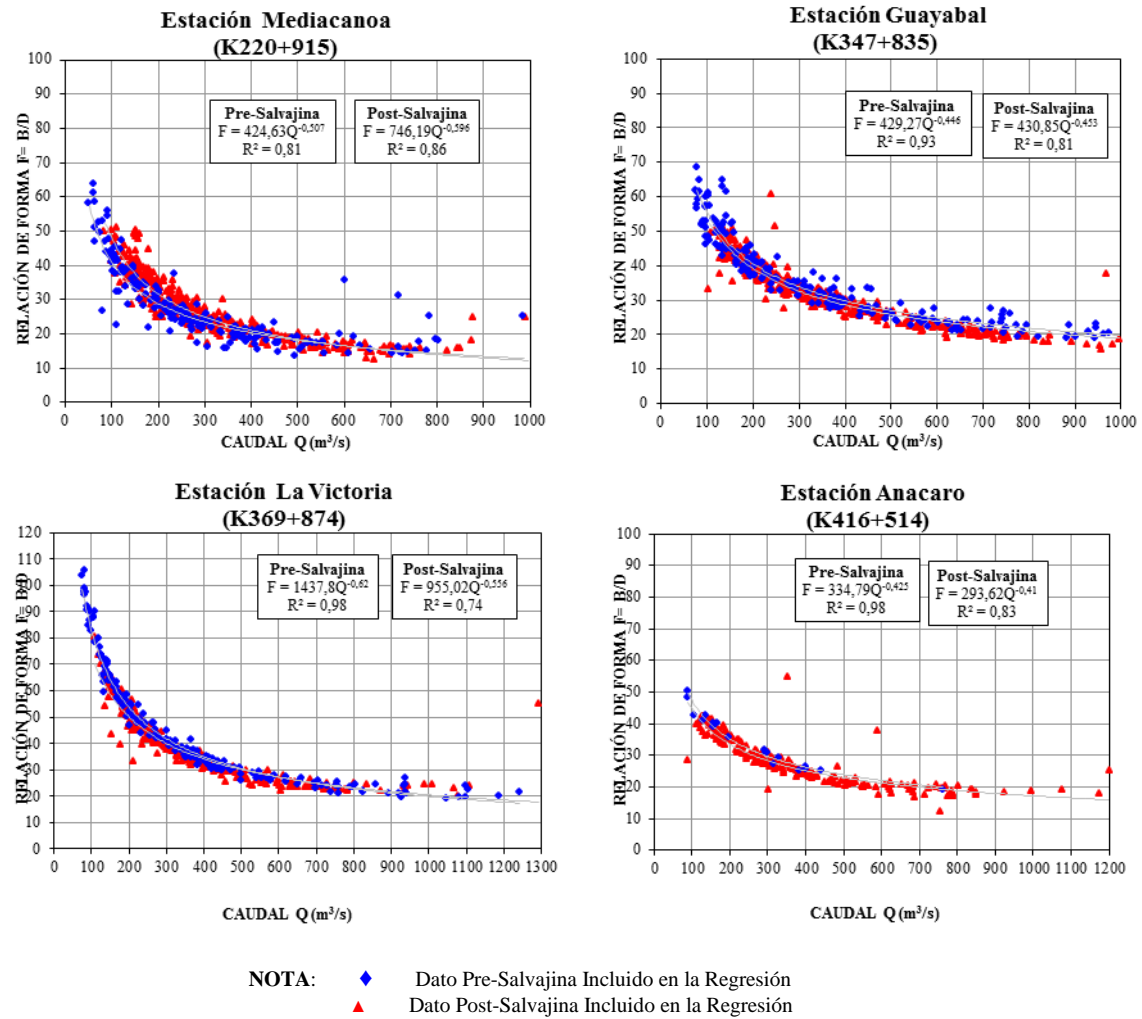
**NOTA:**    ♦    Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
               ▲    Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 14:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Relación de Forma para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.

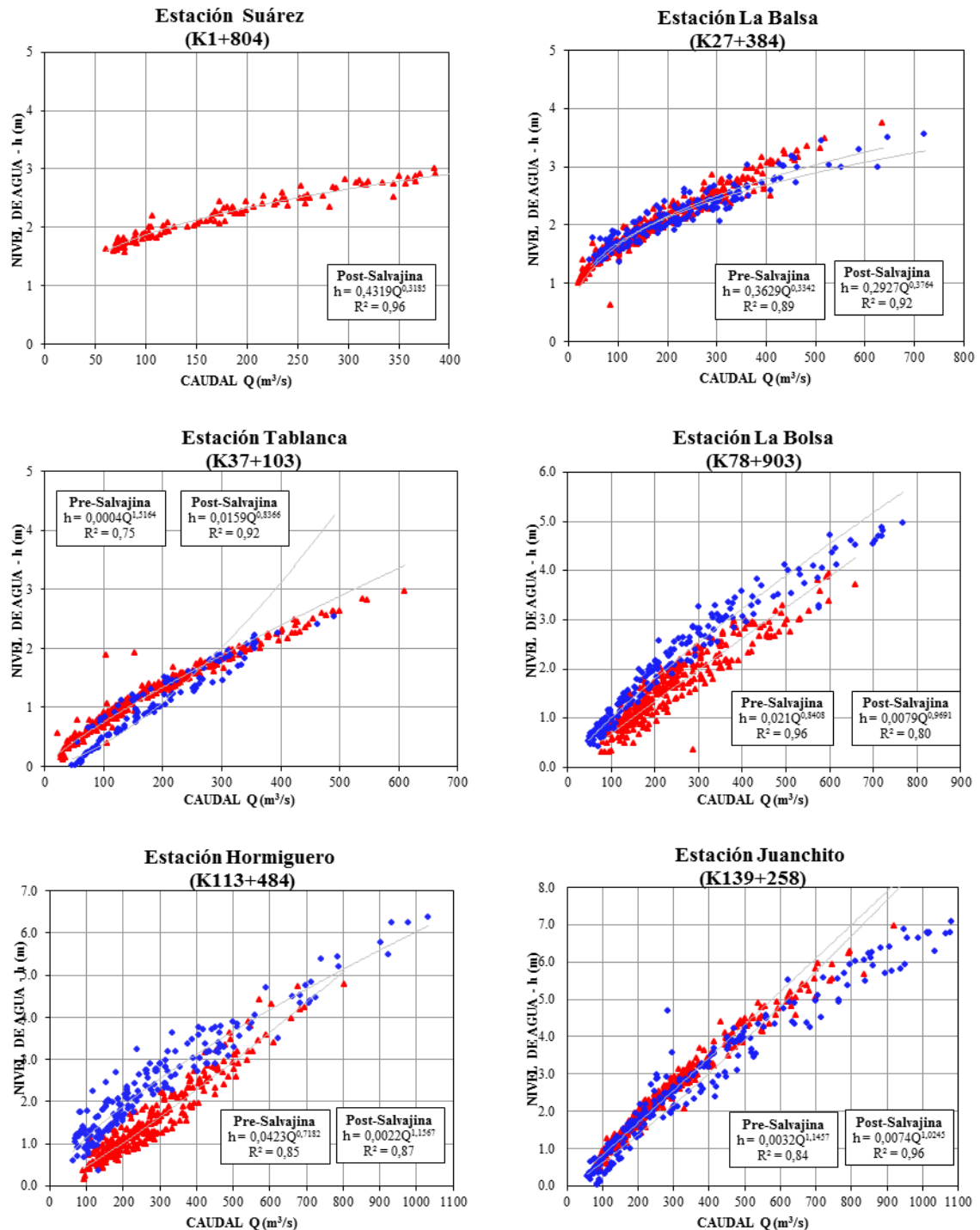


NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 14:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Relación de Forma para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).

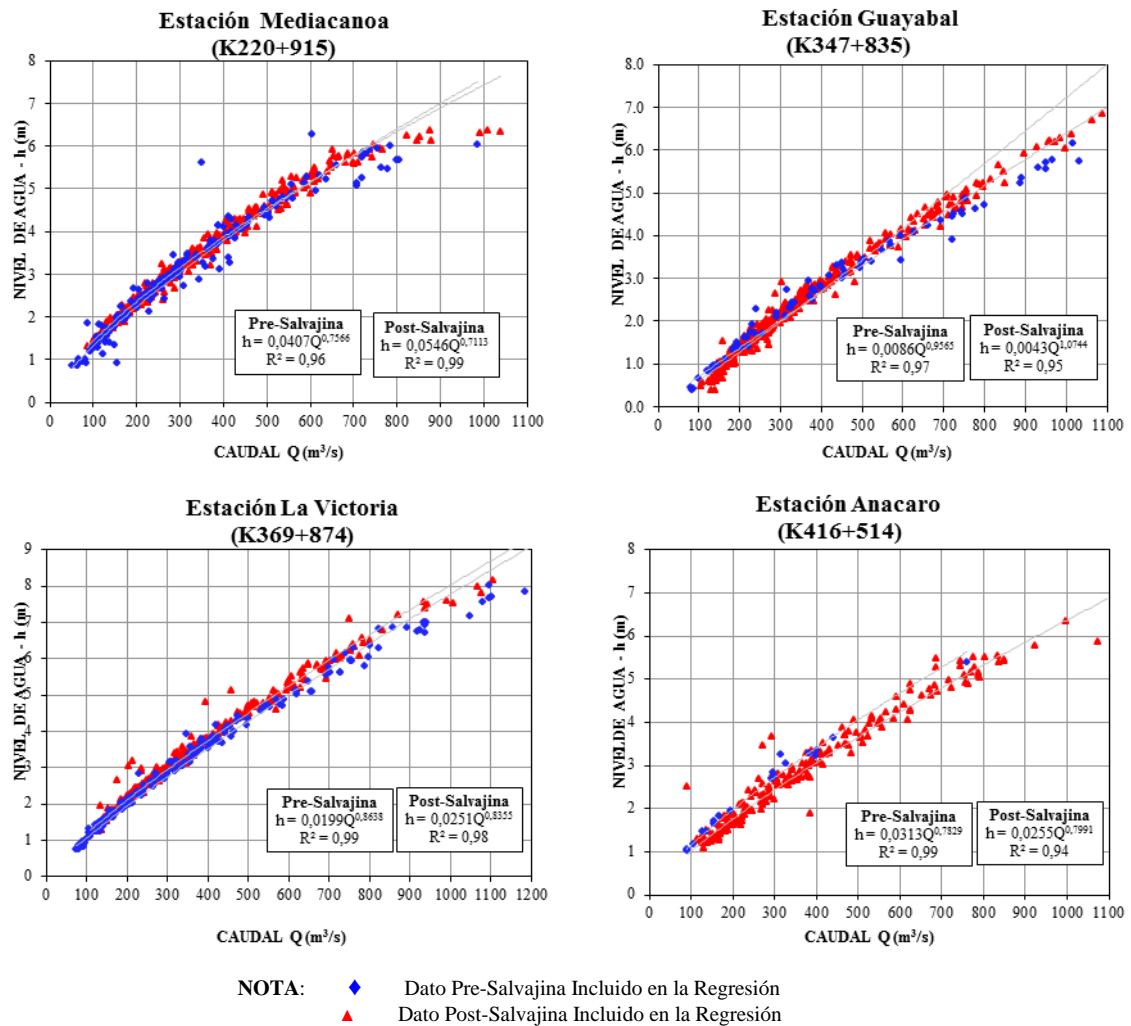


**Figura 15:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Nivel de Agua para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina.



NOTA: ◆ Dato Pre-Salvajina Incluido en la Regresión  
 ▲ Dato Post-Salvajina Incluido en la Regresión

**Figura 15:** Relaciones de geometría hidráulica Caudal vs Nivel de Agua para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina (cont.).



**Tabla 14.** Validación de las relaciones de geometría hidráulica entre el caudal y las variables ancho profundidad hidráulica y velocidad en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca período Pre-Salvajina.

Estación	Periodo	Exponentes			$b+d+f$	Coeficientes			$a \times c \times e$
		$b$	$f$	$d$		$a$	$e$	$c$	
La Balsa	1971-1984	0.009	0.64	0.351	1.000	60.51	0.039	0.43	1.000
Tablanca	1978-1984	0.024	0.655	0.321	1.000	52.887	0.035	0.54	0.998
La Bolsa	1971-1984	0.055	0.347	0.599	1.001	53.626	0.139	0.13	0.999
Hormiguero	1974-1984	0.286	0.188	0.526	1.000	18.191	0.424	0.13	1.001
Juanchito	1970-1984	0.134	0.248	0.617	0.999	37.903	0.289	0.09	1.008
Mediacanoa	1972-1984	0.087	0.32	0.593	1.000	56.081	0.135	0.13	0.999
Guayabal	1971-1984	0.093	0.355	0.538	0.986	63.877	0.113	0.15	1.075
La Victoria	1971-1984	0.07	0.24	0.690	1.000	80.313	0.223	0.06	1.003
Anacaro	1975-1984	0.086	0.404	0.511	1.001	60.576	0.091	0.18	1.000
Promedio =		0.094	0.377	0.527					



**Tabla 15.** Validación de las relaciones de geometría hidráulica entre el caudal y las variables ancho profundidad hidráulica y velocidad en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca período Post-Salvajina.

Estación	Período	Exponentes			$b+d+f$	Coeficientes			$a \times c \times e$
		$b$	$d$	$f$		$a$	$c$	$e$	
La Balsa	1992-2014	0.118	0.521	0.362	1.000	49.142	0.15	0.135	0.999
Tablanca	1985-2010	0.132	0.541	0.327	1.000	41.413	0.14	0.171	1.000
La Bolsa	1992-2007	0.101	0.554	0.346	1.001	59.581	0.14	0.121	0.993
Hormiguero	1992-2013	0.032	0.309	0.659	1.000	50.743	0.54	0.037	1.002
Juanchito	1990-2007	0.032	0.525	0.443	1.000	75.961	0.18	0.072	1.000
Mediacanoa	1990-2013	0.081	0.677	0.242	1.000	59.248	0.08	0.212	0.999
Guayabal	1996-2013	0.075	0.278	0.647	1.000	46.738	0.49	0.043	0.999
La Victoria	1995-2013	0.128	0.555	0.318	1.000	35.903	0.14	0.193	1.000
Anacaro	1995-2013	0.208	0.330	0.462	1.000	16.880	0.31	0.191	0.999
Promedio =		0.101	0.477	0.423					

Al realizar las comparaciones de los valores promedio de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica para las variables ancho, profundidad hidráulica y velocidad, con los valores promedio encontrados en otros estudios, como los realizados por Leopold y Maddock (1953) en el Medio Oeste de USA, en la **Tabla 16** se observa que los valores para los exponentes del ancho, profundidad y velocidad difieren mucho a los registrados en dicho estudio. Esto se debe a que los ríos aluviales con los cuales se realizaron los estudios en USA no poseen las mismas características morfológicas como la pendiente del río, el tamaño de los sedimentos y la dinámica del cauce aluvial de río Cauca.

**Tabla 16:** Comparación de los exponentes  $b, d$  y  $f$  obtenidos para el río Cauca.

Coeficientes	$b$	$d$	$f$
Promedio para 20 ríos diferentes del mundo	0.26	0.4	0.34
Promedio para río Cauca, período Pre-Salvajina	0.094	0.527	0.377
Promedio para río Cauca, período Post-Salvajina	0.101	0.477	0.423

Desde la **Tabla 17** hasta la **Tabla 19**, se muestra el resumen de los resultados obtenidos para todas las variables de estudio (ancho, profundidad hidráulica, velocidad, área, sólidos en suspensión, radio hidráulico, perímetro mojado, número de Froude, relación de forma y nivel de agua), para las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca.

**Tabla 17.** Resumen de las relaciones de geometría hidráulica en las estaciones del río Cauca entre el caudal y las variables ancho, profundidad y velocidad.

Estación	Período	Número aforos	$B = aQ^b$ (m)			$D = cQ^d$ (m)			$V = eQ^f$ (m/s)		
			$a$	$b$	$R^2$	$c$	$d$	$R^2$	$e$	$f$	$R^2$
<b>Suárez</b>	Post-Salvajina	144	16.880	0.208	0.79	0.31	0.330	0.78	0.191	0.462	0.84
<b>La Balsa</b>	Pre-Salvajina	211	60.510	0.009	0.02	0.43	0.351	0.76	0.039	0.640	0.93
	Post-Salvajina	406	46.738	0.075	0.24	0.49	0.278	0.72	0.043	0.647	0.98
	General	617	52.353	0.047	0.11	0.43	0.321	0.62	0.045	0.632	0.94
<b>Tablanca</b>	Pre-Salvajina	119	52.887	0.024	0.29	0.54	0.321	0.94	0.035	0.655	0.99
	Post-Salvajina	292	50.743	0.032	0.39	0.54	0.309	0.93	0.037	0.659	0.98
	General	411	51.173	0.030	0.37	0.53	0.315	0.92	0.113	0.533	0.15
<b>La Bolsa</b>	Pre-Salvajina	205	53.626	0.055	0.08	0.13	0.599	0.88	0.139	0.347	0.77
	Post-Salvajina	321	75.961	0.032	0.19	0.18	0.525	0.87	0.072	0.443	0.84
	General	526	58.231	0.065	0.07	0.15	0.564	0.90	0.112	0.371	0.72
<b>Hormiguero</b>	Pre-Salvajina	190	18.191	0.286	0.72	0.13	0.526	0.88	0.424	0.188	0.70
	Post-Salvajina	297	49.142	0.118	0.34	0.15	0.521	0.76	0.135	0.362	0.56
	General	487	27.369	0.219	0.54	0.14	0.529	0.80	0.266	0.252	0.42
<b>Juanchito</b>	Pre-Salvajina	252	37.903	0.134	0.72	0.09	0.617	0.98	0.289	0.248	0.90
	Post-Salvajina	425	35.903	0.128	0.65	0.14	0.555	0.94	0.193	0.318	0.91
	General	677	35.125	0.138	0.61	0.12	0.583	0.94	0.239	0.279	0.88
<b>Mediacanoa</b>	Pre-Salvajina	197	56.081	0.087	0.40	0.13	0.593	0.90	0.135	0.320	0.73
	Post-Salvajina	367	59.248	0.081	0.44	0.08	0.677	0.93	0.212	0.242	0.71
	General	564	57.050	0.086	0.43	0.10	0.633	0.91	0.170	0.281	0.70
<b>Guayabal</b>	Pre-Salvajina	222	63.877	0.093	0.44	0.15	0.538	0.98	0.113	0.355	0.96
	Post-Salvajina	343	59.581	0.101	0.42	0.14	0.554	0.95	0.121	0.346	0.94
	General	565	61.035	0.099	0.43	0.14	0.548	0.96	0.115	0.352	0.94
<b>La Victoria</b>	Pre-Salvajina	191	80.313	0.070	0.75	0.06	0.690	0.99	0.223	0.240	0.94
	Post-Salvajina	269	62.125	0.111	0.60	0.07	0.667	0.84	0.247	0.223	0.39
	General	460	72.026	0.087	0.59	0.06	0.680	0.92	0.242	0.225	0.87
<b>Anacaro</b>	Pre-Salvajina	19	60.576	0.086	0.97	0.18	0.511	0.99	0.091	0.404	0.98
	Post-Salvajina	195	41.413	0.132	0.60	0.14	0.541	0.93	0.171	0.327	0.78
	General	214	45.756	0.116	0.49	0.146	0.536	0.93	0.149	0.347	0.75

**Tabla 18.** Resumen de las relaciones de geometría hidráulica en las estaciones del río Cauca entre el caudal y las variables área, perímetro mojado y radio hidráulico.

Estación	Período	Número aforos	$A = c_2 Q^{e_2}$ (m <sup>2</sup> )			$P = c_1 Q^{e_1}$ (m)			$R = c_3 Q^{e_3}$ (m)		
			$c_2$	$e_2$	$R^2$	$c_1$	$e_1$	$R^2$	$c_3$	$e_3$	$R^2$
<b>Suárez</b>	Post-Salvajina	144	5.228	0.538	0.8	17.335	0.22	0.81	0.302	0.32	0.79
<b>La Balsa</b>	Pre-Salvajina	211	25.849	0.360	0.81	57.240	0.036	0.32	0.452	0.324	0.76
	Post-Salvajina	406	23.079	0.353	0.94	46.875	0.086	0.35	0.492	0.267	0.744
	General	617	22.472	0.368	0.83	51.116	0.065	0.25	0.44	0.304	0.64
<b>Tablanca</b>	Pre-Salvajina	119	28.786	0.345	0.98	50.902	0.049	0.70	0.566	0.296	0.97
	Post-Salvajina	292	27.303	0.341	0.94	49.417	0.054	0.68	0.551	0.287	0.938
	General	411	27.246	0.345	0.93	49.668	0.033	0.69	0.548	0.283	0.921
<b>La Bolsa</b>	Pre-Salvajina	205	7.177	0.653	0.92	46.560	0.099	0.26	0.154	0.555	0.93
	Post-Salvajina	321	13.828	0.557	0.89	68.972	0.063	0.51	0.201	0.494	0.875
	General	526	8.906	0.629	0.88	51.720	0.102	0.18	0.172	0.527	0.907
<b>Hormiguero</b>	Pre-Salvajina	190	2.358	0.812	0.98	17.917	0.298	0.77	0.132	0.514	0.89
	Post-Salvajina	297	7.415	0.639	0.80	45.259	0.143	0.48	0.164	0.495	0.757
	General	487	3.757	0.748	0.86	26.144	0.238	0.62	0.144	0.511	0.808
<b>Juanchito</b>	Pre-Salvajina	252	3.472	0.752	0.99	34.025	0.167	0.83	0.102	0.585	0.98
	Post-Salvajina	425	5.184	0.683	0.98	32.203	0.163	0.80	0.161	0.52	0.95
	General	677	4.181	0.721	0.98	31.707	0.171	0.75	0.132	0.55	0.943
<b>Mediacanoa</b>	Pre-Salvajina	197	7.407	0.679	0.93	57.352	0.095	0.79	0.137	0.573	0.91
	Post-Salvajina	367	4.703	0.758	0.96	57.861	0.097	0.14	0.088	0.646	0.943
	General	564	5.897	0.719	0.94	56.685	0.1	0.23	0.111	0.606	0.922
<b>Guayabal</b>	Pre-Salvajina	222	8.889	0.643	0.99	58.751	0.118	0.76	0.162	0.512	0.98
	Post-Salvajina	343	8.237	0.655	0.98	60.363	0.109	0.69	0.144	0.537	0.966
	General	565	8.684	0.647	0.98	60.052	0.112	0.66	0.15	0.528	0.968
<b>La Victoria</b>	Pre-Salvajina	191	4.487	0.760	0.99	71.620	0.099	0.86	0.063	0.661	0.99
	Post-Salvajina	269	4.056	0.777	0.88	55.311	0.14	0.74	0.073	0.637	0.835
	General	460	4.322	0.766	0.94	64.294	0.115	0.73	0.067	0.651	0.916
<b>Anacaro</b>	Pre-Salvajina	19	10.961	0.597	0.99	56.161	0.111	0.99	0.195	0.486	0.99
	Post-Salvajina	195	5.838	0.673	0.94	37.724	0.16	0.72	0.155	0.512	0.934
	General	214	6.694	0.65	0.915	41.568	0.145	0.627	0.161	0.507	0.927

**Tabla 19.** Resumen de las relaciones de geometría hidráulica en las estaciones del río Cauca entre el caudal y las variables relación de forma, sólidos en suspensión, nivel de agua y número de Froude.

Estación	Período	Número aforos	$F = kQ^w$			$S_s = pQ^j$ (Ton/ día )			$h = rQ^i$ (m)			$F_r = x_1 Q^{x_2}$		
			$k$	$w$	$R^2$	$p$	$j$	$R^2$	$r$	$i$	$R^2$	$x_1$	$x_2$	$R^2$
Suárez	Post-Salvajina	144	54.56	-0.122	0.25	0.348	1.657	0.540	0.432	0.319	0.96	0.110	0.297	0.53
La Balsa	Pre-Salvajina	211	141.60	-0.341	0.67	0.145	1.995	0.47	0.363	0.334	0.89	0.019	0.465	0.75
	Post-Salvajina	406	94.65	-0.203	0.32	0.118	1.869	0.52	0.293	0.376	0.92	0.020	0.508	0.91
	General	617	121.97	-0.274	0.36	-	-	-	0.313	0.363	0.91	0.022	0.471	0.74
Tablanca	Pre-Salvajina	119	97.17	-0.297	0.92	-	-	-	0.131	0.468	0.50	0.015	0.494	0.97
	Post-Salvajina	292	94.31	-0.277	0.89	-	-	-	0.016	0.837	0.92	0.016	0.505	0.95
	General	411	96.17	0.036	0.12	-	-	-	0.008	0.963	0.73	0.022	0.375	0.18
La Bolsa	Pre-Salvajina	205	400.74	-0.544	0.77	-	-	-	0.021	0.841	0.96	0.122	0.047	0.04
	Post-Salvajina	321	417.30	-0.493	0.83	-	-	-	0.008	0.969	0.80	0.054	0.181	0.28
	General	526	380.78	-0.498	0.64	-	-	-	0.016	0.865	0.81	0.092	0.090	0.09
Hormiguero	Pre-Salvajina	190	140.42	-0.241	0.31	0.003	1.737	0.820	0.042	0.718	0.85	0.376	-0.075	0.14
	Post-Salvajina	297	325.72	-0.403	0.56	0.024	2.179	0.820	0.002	1.157	0.87	0.110	0.102	0.05
	General	487	198.96	-0.310	0.42	-	-	-	0.013	0.877	0.65	0.228	-0.012	0.00
Juanchito	Pre-Salvajina	252	413.83	-0.483	0.90	0.048	2.071	0.660	0.003	1.146	0.84	0.304	-0.060	0.20
	Post-Salvajina	425	248.63	-0.427	0.81	0.026	2.178	0.700	0.007	1.025	0.96	0.162	0.040	0.06
	General	677	295.08	-0.445	0.77	-	-	-	0.005	1.077	0.87	0.221	-0.012	0.01
Mediacanoa	Pre-Salvajina	197	424.63	-0.507	0.81	0.026	2.207	0.820	0.041	0.757	0.96	0.119	0.024	0.01
	Post-Salvajina	367	746.19	-0.596	0.86	0.028	1.189	0.870	0.055	0.711	0.99	0.241	-0.096	0.14
	General	564	551.89	-0.547	0.82	-	-	-	0.047	0.735	0.97	0.168	-0.035	0.02
Guayabal	Pre-Salvajina	222	429.27	-0.446	0.93	0.160	1.901	0.690	0.005	1.034	0.96	0.088	0.099	0.52
	Post-Salvajina	343	430.85	-0.453	0.81	0.027	1.169	0.790	0.004	1.074	0.95	0.104	0.069	0.23
	General	565	428.87	-0.449	0.83	-	-	-	0.005	1.044	0.95	0.096	0.083	0.36
La Victoria	Pre-Salvajina	191	1437.80	-0.620	0.98	0.093	0.029	0.930	0.020	0.864	0.99	0.301	-0.105	0.59
	Post-Salvajina	269	955.02	-0.556	0.74	0.045	2.074	0.790	0.025	0.836	0.98	0.365	-0.142	0.47
	General	460	1201.00	-0.593	0.87	-	-	-	0.022	0.853	0.98	0.315	-0.115	0.35
Anacaro	Pre-Salvajina	19	334.79	-0.425	0.98	0.022	2.239	0.970	0.031	0.783	0.99	0.069	0.148	0.77
	Post-Salvajina	195	293.62	-0.410	0.83	0.016	2.280	0.890	0.026	0.799	0.94	0.149	0.052	0.06
	General	214	312.63	-0.42	0.836	-	-	-	0.028	0.788	0.943	0.125	0.079	0.08

En la **Tabla19**, se muestran los resultados de las relaciones de geometría hidráulica obtenidas para las estaciones hidrométricas del río Cauca, donde observa que la información de la relación potencial caudal vs sólidos en suspensión, se encuentra incompleta para algunas estaciones, debido principalmente a la carencia de información acerca de esta variable medida en los aforos por la CVC. Para la mayoría de las estaciones se computó la relación potencial de la carga de sedimentos para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina, sin embargo no se obtuvo la relación potencial general puesto que los registros no son continuos, por lo cual no se tendría una representación veraz de las condiciones del río. Las estaciones que no poseen información sobre los sólidos en suspensión, son Tablanca y La Bolsa para las cuales no se obtuvo ningún tipo de relación potencial de carga de sedimentos.

En los resultados mostrados anteriormente también se observa la gran variación que presentan los coeficientes y los exponentes de las ecuaciones planteadas para las diferentes estaciones sobre el río, confirmando de esta manera la irregular geometría que se observa a lo largo de todo el cauce. Es posible diferenciar dos tramos: La Balsa-Hormiguero y Juanchito-Anacaro, en los cuales algunos de los coeficientes y exponentes difieren ampliamente. Esto es el resultado de múltiples factores, como pueden ser la variación de la pendiente del cauce, las diferentes intervenciones a que viene siendo sometido el río.

En algunas de las ecuaciones de geometría hidráulica se obtuvieron exponentes negativos, como lo es el caso de la ecuación Relación de forma vs Caudal para todas las estaciones en los tres períodos analizados (Pre-Salvajina, Post-Salvajina y General), y para las ecuaciones de Número de Froude vs Caudal, para la estación Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, La Victoria y Anacaro; dichos exponentes negativos indican que para un aumento en el caudal, el parámetro factor de forma disminuye; como este parámetro está explicado por la relación entre el ancho y la profundidad, quiere decir que la profundidad aumenta más que el ancho cuando se aumenta el caudal, es por ello que se tienen relaciones de menor valor, con cada aumento de la descarga. Con respecto al número de Froude, se tiene que en las estaciones donde el exponente de la regresión es negativo, se encuentra el estado de flujo en subcrítico ya que al disminuir la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de gravedad, las cuales están explicadas por esta variable, el tirante de agua se encuentra siempre por encima de su valor crítico, para las secciones de Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, La Victoria y Anacaro.

En concordancia con lo anterior, se puede observar que las ecuaciones en las cuales el coeficiente de determinación es inferior a 0.5, se tiene que menos del 50% de los datos utilizados en la regresión como variable dependiente (ancho, profundidad hidráulica, velocidad, área, sólidos en suspensión, radio hidráulico, perímetro mojado, número de Froude, relación de forma y nivel de agua) según sea el caso, está representado por el caudal, por lo cual la ecuación obtenida no puede ser utilizada como predictor para el parámetro hidráulico, geométrico o sedimentológico en cuestión. Por otra parte los análisis de los coeficientes y exponentes de las relaciones de geometría hidráulica se enfocarán principalmente en el período Post-Salvajina, debido a que este es el que está afectado por el régimen regulado de caudales, producidos por el embalse de Salvajina. En el mismo orden de ideas se tiene que, las variables que mejor coeficiente de determinación arrojaron fueron:

- La profundidad hidráulica para todas las estaciones presenta un coeficiente de determinación superior a 0.5, y su valor oscila entre 0.72 y 0.95 para la estación La Balsa y Guayabal respectivamente.
- El ancho en muchas estaciones posee un coeficiente de determinación  $R^2$  muy bajo, (por debajo de 0.5) esto puede ser debido principalmente a que muchas de las estaciones de medición se encuentran localizadas en zonas donde hay puentes sobre el río, en los cuales se hallan generalmente tablestacados; para proteger los estribos de la erosión producida por la corriente, por ende el ancho no varía o varía muy poco (generalmente) al variar el caudal. El rango de variación de los exponentes de esta variable varía entre 0.19 y 0.79.

- La velocidad para la mayoría de las estaciones presenta un buen coeficiente de determinación ya que el valor es superior al 0.5, exceptuando el exponente de la velocidad para la estación La Victoria ya que este posee un valor de 0.39, se presenta un coeficiente de determinación máximo de 0.98 en la estación de Tablanca.
- El área mojada es una de las variables que mejor factor  $R^2$  presenta en todas las estaciones su rango de variación esta entre 0.80 para la estación Hormiguero y 0.98 para las estaciones Juanchito y Guayabal.
- El perímetro mojado, presenta valores para el  $R^2$  inferior al 0.5 en las estaciones La Balsa, Hormiguero y Mediacanoa por lo cual no podría ser usado como predictor. En la estación que mejor valor presenta el coeficiente de determinación es Suárez para el cual este tiene un valor de 0.81.
- El radio hidráulico para todas las estaciones hidrométricas presenta valores para el coeficiente  $R^2$  superiores a 0.74, por lo cual se pueden utilizar para ser utilizados como predictores.
- El factor de forma puede ser usado como predictor para las estaciones Tablanca, La Balsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria, Anacaro ya que posee para las regresiones un coeficiente de determinación superior a 0.56, mientras que las estaciones Suárez y La Balsa poseen  $R^2$  inferiores 0.32, o sea muy bajos.
- Para las estaciones donde se pudo obtener la ecuación de geometría hidráulica para los sólidos en suspensión, se obtuvo en general buenos resultados correspondientes a los coeficientes de determinación, dichos valores oscilan entre 0,52 y 0,89.
- Con respecto al nivel de mira se observa que los valores del  $R^2$  son muy buenos porque varían entre 0.80 y 0.99, siendo una variable que se puede estimar con buena precisión con las ecuaciones de geometría hidráulica.
- Por último la variable Número de Froude, es la que presenta los valores para el coeficiente  $R^2$ , en la mayoría de las estaciones el valor de este está por debajo de 0,47. Las estaciones donde se obtuvo un buen coeficiente de determinación son Suárez donde el valor es de 0.5 y La Balsa, Tablanca donde los valores son de 0.91 y 0.95 respectivamente.

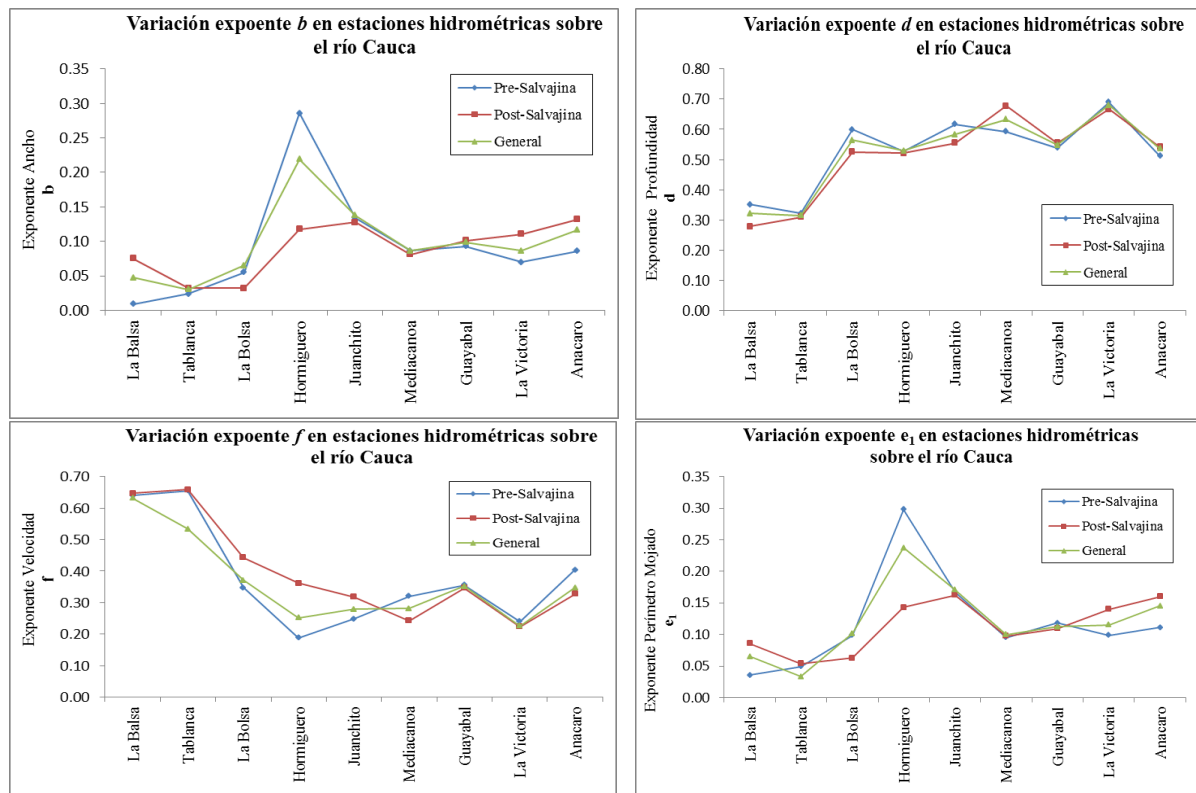
## **7.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS RELACIONES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA OBTENIDAS EN LAS ESTACIONES SOBRE EL RÍO CAUCA PARA LOS PERÍODOS PRE-SALVAJINA Y POST-SALVAJINA**

Como se dijo anteriormente la represa de Salvajina entró en operación en el año 1985. Este es un proyecto de embalse multipropósito que tiene por finalidad la generación de energía, la regulación de los caudales durante las crecientes en el río Cauca y el alivio de las contaminación. Debido a esto, después del año 1985 el régimen natural de caudales en el río

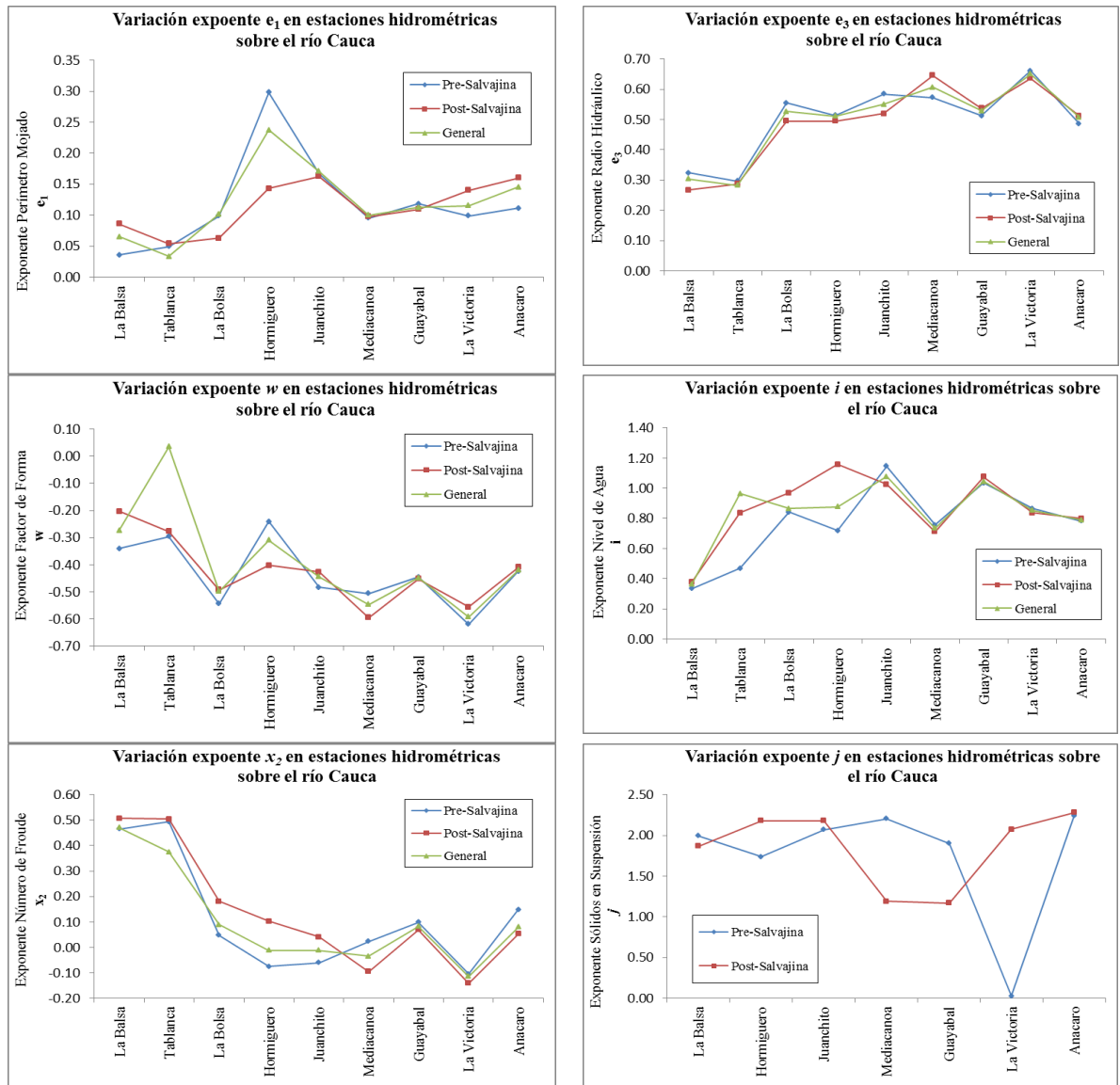
Cauca ha sido modificado artificialmente, lo cual ha afectado el comportamiento de los diferentes parámetros hidráulicos, geométricos y sedimentológicos del río. El resultado de los análisis gráficos y numéricos realizados muestra claramente los cambios relacionados en las diferentes ecuaciones de geometría hidráulica, por la regulación de los caudales del río. En síntesis la entrada en operación del embalse de Salvajina ha ocasionado la variación en la hidráulica, el transporte de sedimentos y la morfología del río Cauca, lo cual se refleja en la variación de los exponentes de geometría hidráulica para los dos períodos.

En concordancia con lo anterior, a continuación se muestran los análisis comparativos de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica obtenidos para los períodos Pre-Salvajina, Post-Salvajina y General. En la **Figura 16**, se observan gráficamente las variaciones de todos los exponentes obtenidos en las relaciones potenciales, a lo largo de la corriente del río, de estación en estación para los tres períodos de análisis.

**Figura 16.** Variaciones de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica en estación para los períodos Pre-Salvajina, Post-Salvajina y General para estaciones sobre el río Cauca.



**Figura16.** Variaciones de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica en estación para los períodos Pre-Salvajina, Post-Salvajina y General para estaciones sobre el río Cauca (cont.).



Para el ancho se tiene que las mayores variaciones en las ecuaciones de geometría hidráulica, tanto en los exponentes como en los coeficientes, se generan en la estación Hormiguero donde el exponente pasa de 0.286 a 0.118, mientras que la mínima variación se presentó en la estación Juanchito donde el exponente del ancho disminuyó de 0.134 a 0.128 para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina. El ancho a lo largo de cauce no tiene un comportamiento característico pues en unas estaciones aumentó y en otras disminuyó, teniendo en cuenta los coeficientes de ajuste y los valores de los exponentes para los dos períodos.



Las variaciones más significativas en la profundidad de la sección transversal se dieron en la estación de Mediacanoa, mientras que la mínima variación se produjo en la estación de Hormiguero.

Con respecto a la velocidad media del flujo, la estación que mayor variación presentó para los períodos analizados fue la estación Hormiguero, en donde los valores del ancho aumentaron para el período Pre-Salvajina, mostrando que la estación puede tener taludes que posiblemente están constituidos, con materiales de baja cohesión y se erosionan con mayor facilidad por acción de la fuerza tractiva del agua. Por otra parte la mínima variación para el ancho, se presentó en la estación Tablanca; este resultado puede estar asociado a la resistencia a la erosión que poseen los taludes, o también a la presencia de tablestacados en la sección de medición.

Los exponentes de la ecuación de geometría hidráulica del área mojada donde más se manifestó el cambio entre los periodos Pre-Salvajina y Post- Salvajina, son los obtenidos para la estación Hormiguero, con una disminución de 0.17, seguido de la estación La Bolsa donde el exponente disminuyó 0.1. La estación en la cual se produjo el menor cambio en el área fue la estación de Mediacanoa donde los exponentes para los dos períodos continúan casi iguales. Con respecto al área se produjo una disminución en el tramo La Balsa-Juanchito, mientras que en el tramo Mediacanoa-Anacaro el área aumentó.

El perímetro mojado por ser una variable que está relacionada directamente con el ancho, puesto que el río Cauca es una canal suficientemente ancho, varía de la misma manera que el ancho de la sección, es por ello que las mayores variaciones se presentaron en la estación de Hormiguero, y las mínimas en la estación Juanchito.

El radio hidráulico de las secciones transversales, varía en la misma proporción tanto en los exponentes como en los coeficientes de ajuste de las ecuaciones de geometría hidráulica, donde la mayor variación entre el período Pre-Salvajina y Post-Salvajina se manifestó en la estación Juanchito y la mínima variación en la estación Mediacanoa.

La relación de forma, también llamada factor de forma es una variable que puede ser útil para el cálculo de los niveles de banca llena de una sección transversal, por lo cual cuando se tiene que esta es una función que tiende a ser constante en los períodos analizados, se tiene que los niveles de las bancas permanecen más fijas ante el cambio de las descargas; en la estación donde se presentó la mayor variación de los exponentes de geometría hidráulica para el factor de forma fue Hormiguero y la mínima variación para la estación de Tablanca, esta última puede presentar este resultado, debido a que esta estación es una de las que menor variación en el ancho posee.

Con respecto a la carga de sedimentos en suspensión, se obtuvieron relaciones potenciales para las estaciones La Balsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria y Anacaro para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina, en donde los mayores cambios en los exponentes de las ecuaciones se vieron en la estación La Victoria, seguido de la estación la Victoria, mientras que los menos cambios se dieron en la estación Anacaro. El comportamiento de esta variable no tiene una forma característica pues la carga de sedimentos en suspensión, es una variable que esta explicada por múltiples factores, exógenos a la naturaleza matemática de

la expresión que la define, como por ejemplo la deforestación en la cuenca y el aporte de sedimentos de los tributarios.

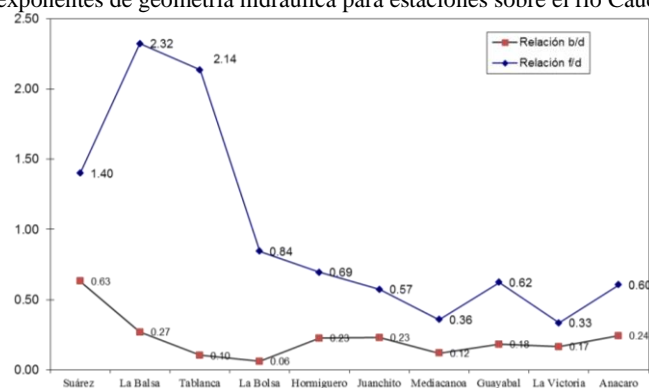
Donde presentaron mayores cambios con respecto al número de Froude, durante los dos períodos analizados fue en la estación Hormiguero y en la estación La Bolsa; lo cual puede ser producto del cambio significativo que tuvieron estas dos estaciones en su velocidad, debido a que el número de Froude, está en función de la velocidad, el estado de flujo de la sección se modifica también. De esta circunstancia nace el hecho de que la estación con menos porcentaje de variación sea Tablanca, donde el exponente del número de Froude pasa de 0.494 a 0.505, presentando un aumento de 0,0108.

## 7.6 ANÁLISIS DE LOS COCIENTES ENTRE LOS EXPONENTES DEL ANCHO, PROFUNDIDAD Y VELOCIDAD DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS SOBRE EL RÍO CAUCA PARA EL PERÍODO POST-SALVAJINA

En los estudios realizados en el año de 1953 por los investigadores Leopold y Maddock, en las corrientes aluviales de los Estados Unidos, se encontraron varias correlaciones entre los cocientes obtenidos con los exponentes, que dan información acerca de condiciones del cauce del río, puesto que al aumentar, disminuir o mantener constante los valores de las variables hidráulicas, se afectan las condiciones hidráulicas y morfológicas de las secciones transversales de los ríos.

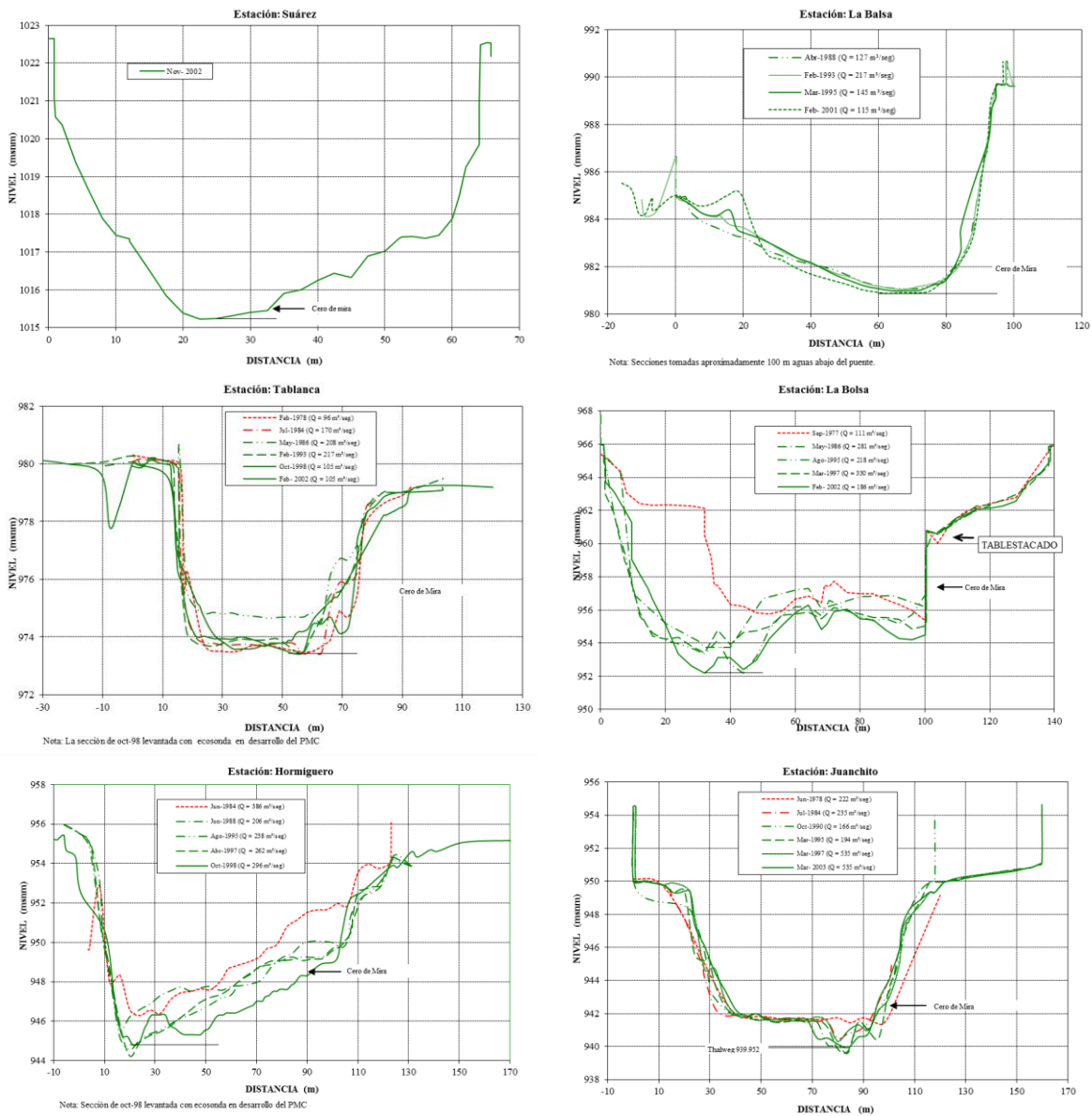
Cuando se correlacionan los valores de los exponentes de  $b$  y  $d$  correspondientes a las variables de ancho y profundidad hidráulica respectivamente, se tiene que para las estaciones donde hay valores bajos de la constante  $b$  y relativamente altos de la constante  $d$  de acuerdo a la experiencia empírica existente, se presentan taludes de alta pendiente casi verticales, que están asociados a la presencia de materiales cohesivos. Por otra parte la relación entre los exponentes de la velocidad y la profundidad hidráulica, están relacionados con el transporte de sedimentos (Leopold y Wolman, 1963). Cuando se tienen altas relaciones para estos dos exponentes, se puede pensar que el transporte de sedimentos aumenta más rápidamente con el cambio del caudal. Al realizar el cálculo para cada relación, entre los exponentes de ancho, velocidad y profundidad para las estaciones hidrométricas se obtienen los resultados consignados en la **Figura 17**.

**Figura 17.** Relación de exponentes de geometría hidráulica para estaciones sobre el río Cauca, período Post-Salvajina.

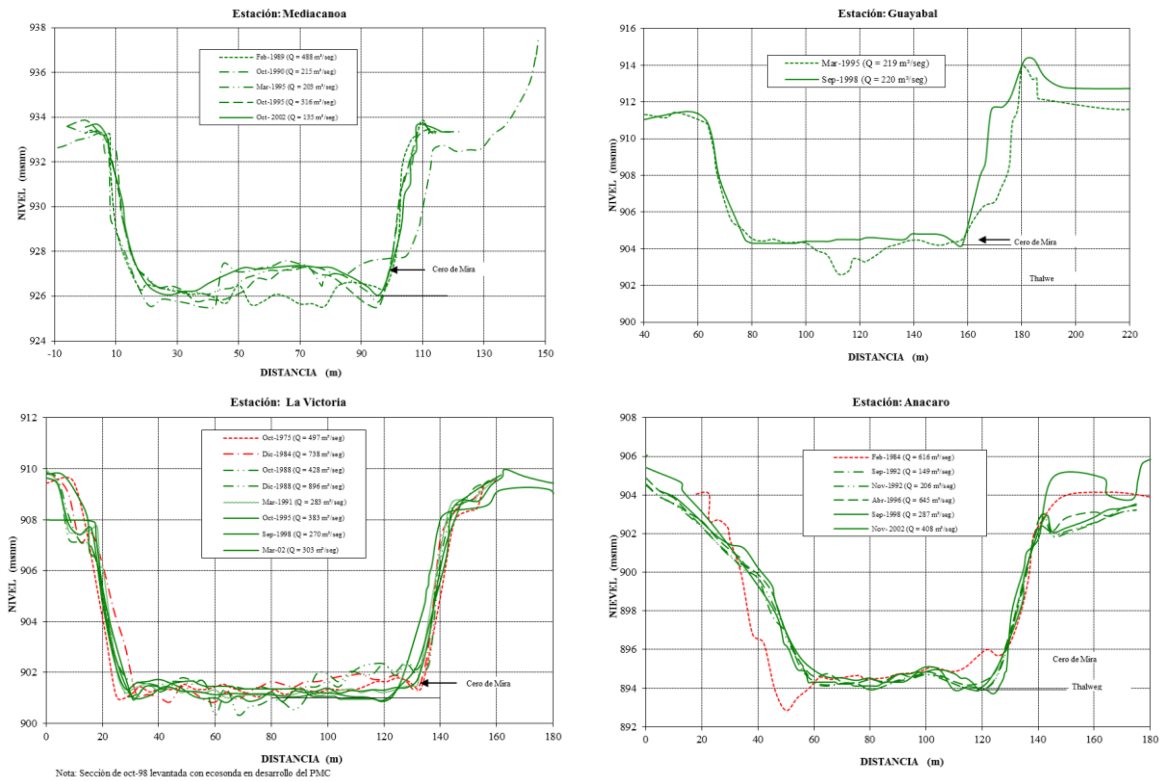


Las relaciones o cocientes entre los exponentes de la profundidad y el ancho dan información acerca de la forma de las secciones transversales, según los resultados mostrados en la **Figura17**, todas las secciones transversales de las estaciones hidrométricas poseen formas trapezoidales con taludes de alta pendiente, con un ángulo de inclinación mayor a  $45^\circ$  como se muestra en la **Figura18**, debido a que todas las relaciones son inferiores a 1; el exponente de la ecuación de geometría hidráulica Profundidad vs Caudal es mayor que el de la relación Ancho vs Caudal, en todas las estaciones sobre el río Cauca.

**Figura 18.** Secciones transversales de las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca, período Post-Salvajina.



**Figura 18.** Secciones transversales de las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca, período Post-Salvajina (cont).



Con respecto al cociente entre los exponentes de las relaciones de velocidad y profundidad hidráulica, se tiene que unas relaciones son mayores a 1 como es el caso de las estaciones Suárez, La Balsa, Tablanca y otras son inferiores al valor de 1, para las estaciones La Bolsa, Hormiguero, Juanchito, Mediacanoa, Guayabal, La Victoria y Anacaro. La relación que existe entre estos exponentes, con el aumento del transporte de sedimentos, indica que cuando exista un aumento superior en la velocidad con respecto al aumento de la profundidad existirá un mayor transporte de sedimentos en la sección. Lo anterior puede ser tomado como un indicativo del comportamiento de las cargas de sedimentos en la sección, sin embargo es necesario realizar los análisis de todas las condiciones que influyen en el transporte de sedimentos, pues este está en función de muchos aspectos; como por ejemplo el estado de deforestación y la actividad antrópica en la cuenca de drenaje.

## 7.7 GEOMETRÍA HIDRÁULICA AGUAS ABAJO

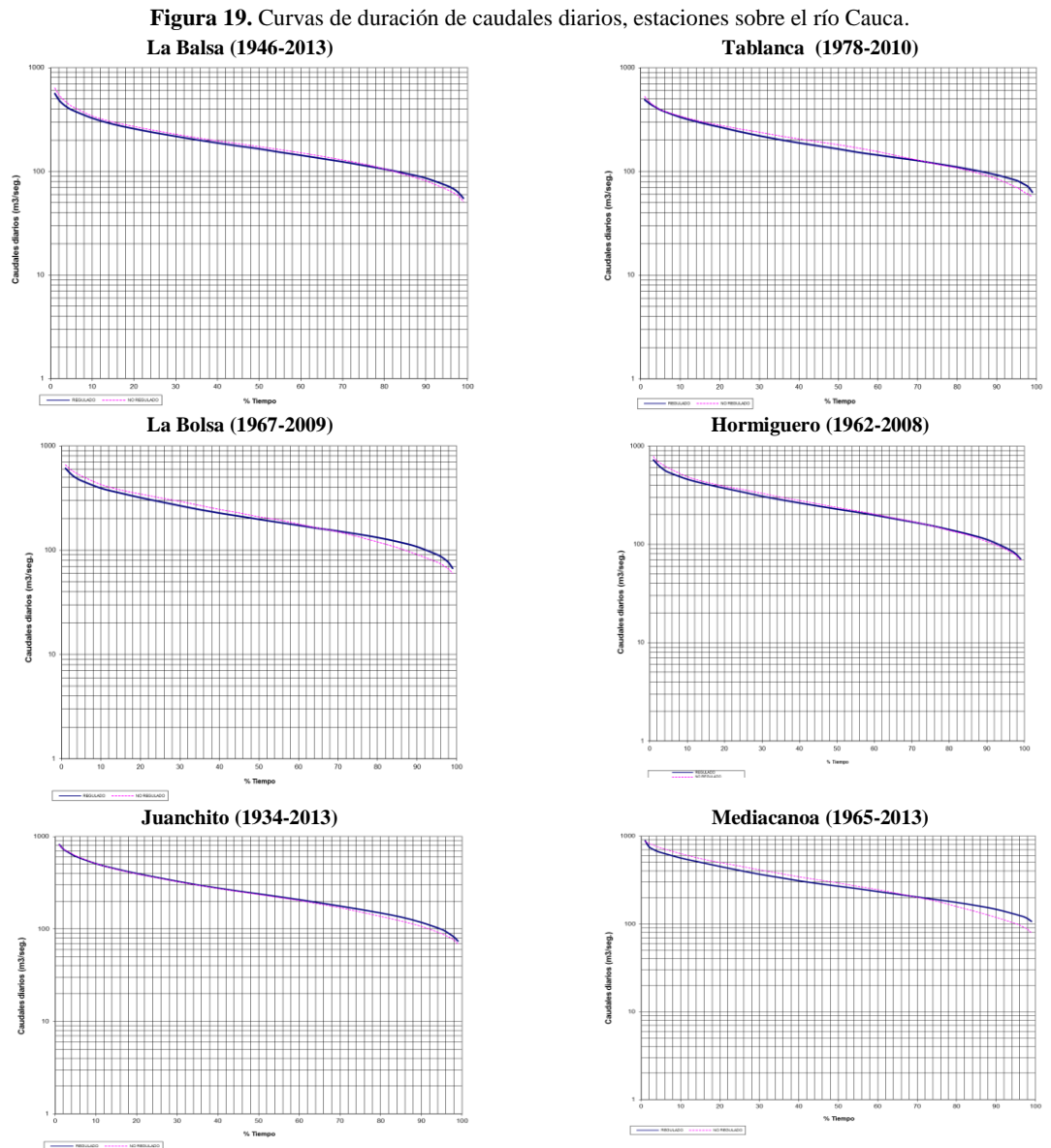
### 7.7.1 CAUDALES CARACTERÍSTICOS:

Con el fin de realizar los diferentes análisis para estimar el comportamiento del río Cauca a lo largo del tramo de estudio se determinaron los caudales característicos o representativos, tales como el caudal dominante, el caudal a banca llena, el caudal medio, caudal de aguas altas (porcentaje de duración de 20%) y caudal de aguas bajas (porcentaje de duración de 80%).

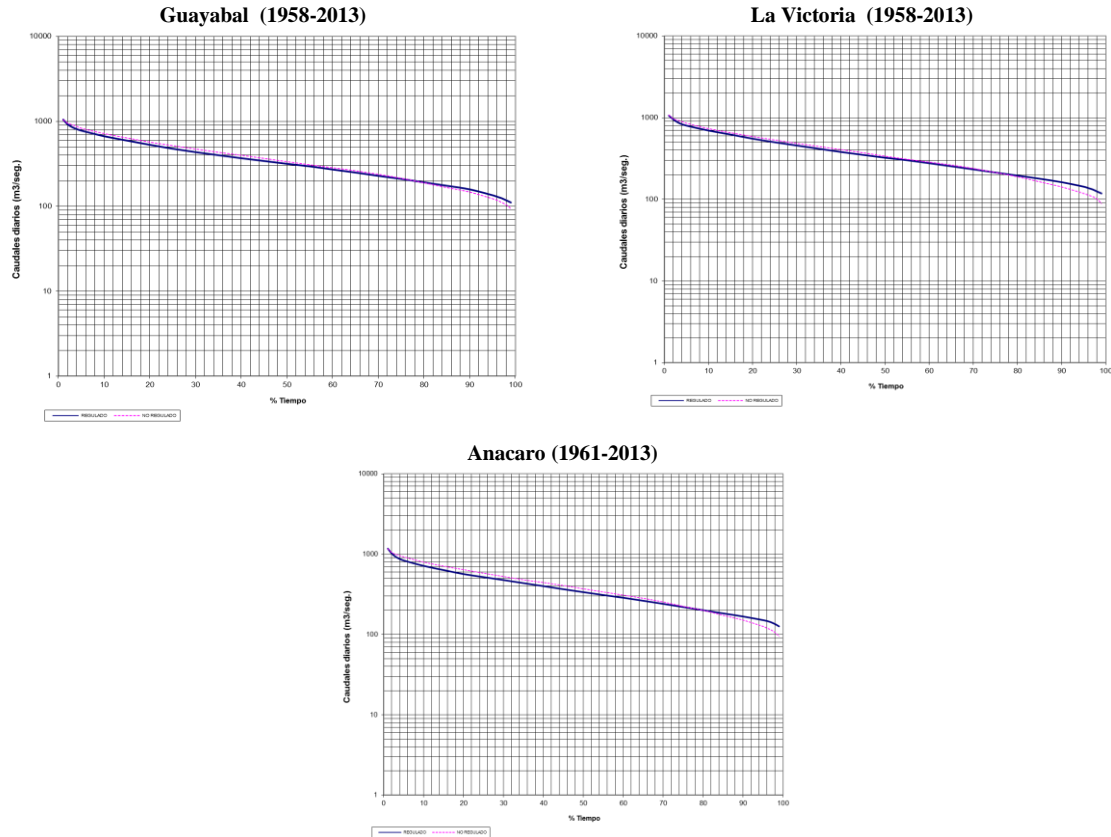
### 7.7.2 CAUDAL DOMINANTE:

El caudal dominante o formativo generalmente se define como el gasto hipotético y permanente que producirá los mismos efectos en la configuración del cauce, que la que produce la variación de los gastos reales. Es decir el concepto de gasto o caudal dominante se emplea con el fin de representar mediante un caudal único, la serie de caudales (variables en el tiempo) en un sitio.

Los caudales dominantes en las estaciones del río Cauca se obtuvieron con las curvas de duración de caudales diarios de acuerdo con los registros de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (mostradas en la **Figura 19**). Se tomó como los caudales dominantes en cada sección para el período Post-Salvajina, los valores para los cuales el caudal que es excedido el 35 % del año.



**Figura19.** Curvas de duración de caudales diarios, estaciones sobre el río Cauca (cont.).



En adición, se obtuvo el valor de los caudales para un porcentaje de duración del 20% y del 80%, mirando el valor en cada una de las curvas de duración mostradas anteriormente. Los valores obtenidos se encuentran consignados en la **Tabla 22**, en la cual se muestra el resumen de los caudales característicos obtenidos.

### 7.7.3 CAUDAL A BANCA LLENA

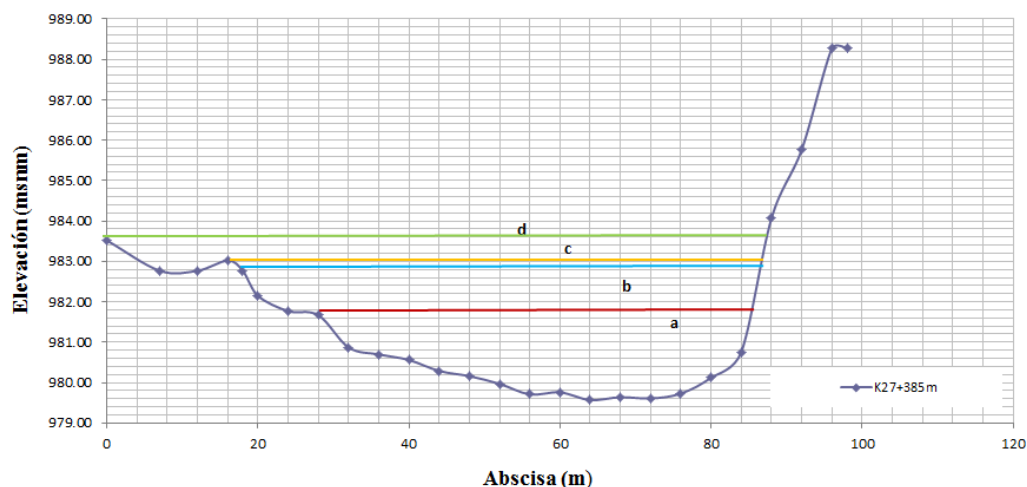
Un caudal de referencia común para las condiciones del río en general, con un intervalo de recurrencia específica se utiliza para integrar los datos de geometría hidráulica para varias secciones a lo largo de la corriente de un río. Las curvas de geometría hidráulica agua abajo, a menudo están calibradas para un caudal común, para todas las secciones de estudio como lo es el caudal a banca llena ( $Q_{bkf}$ ). Que se define como el caudal que llena por completo el cauce del río, hasta la elevación de la llanura de inundación, sin el rebase de las bancas. Dicho caudal es de referencia útil porque se puede estimar en sitios que no son estaciones hidrométricas: solo basándose en las características físicas del canal, y no requiere del conocimiento de la frecuencia de flujo en el río.

Los caudales a banca llena para las estaciones hidrométricas, se calcularon teniendo en cuenta la mínima relación de forma para la sección de cauce estable, o en su defecto la relación que presente una inflexión en el trazado de la curva Relación de Forma vs Profundidad, según

sugiere Wolman(1957). En concordancia con lo anterior se desarrollaron los cálculos del caudal a banca llena tomando la siguiente metodología:

Se toma como muestra la estación La Balsa, para el cálculo del caudal a banca llena, y a continuación resultados obtenidos para las demás estaciones hidrométricas.

**Figura 20.** Sección transversal, estación hidrométrica La Balsa.



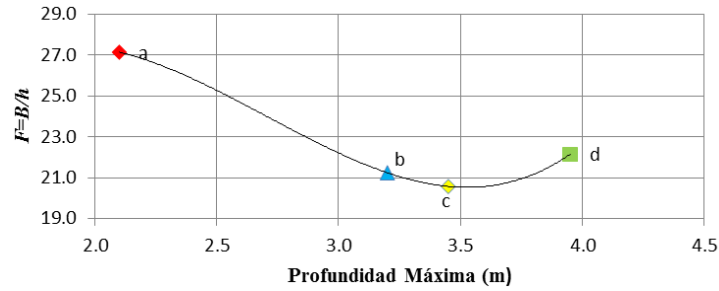
En la **Figura 20** se muestran los distintos niveles de mira, para los cuales se calculó la relación de forma, teniendo en cuenta la profundidad máxima al thalweg y el nivel de cero de mira registrado para dicha estación, para los cuales se muestran los resultados en la **Tabla 20**, en la cual se observa el nivel de umbral de banca llena, para la sección que fue levantada el 25 de Agosto del año 2004, en la campaña realizada por el PMC.

En la **Figura 21**, se muestran gráficamente los resultados obtenidos para las relaciones de forma, mostrando un punto de inflexión en la curva, para el nivel c, en donde se encuentra el umbral de banca llena.

**Tabla 20:** Calculo de las relaciones de forma para sección transversal La Balsa, período post Salvajina.

Cota Cero Mira (msnm)		980.52				
Cota Profundidad Máxima (msnm)		979.57	Ancho	Máxima Profundidad al Thalweg	Relación de Forma	Máxima Profundidad al Cero Mira
Punto	Abscisa	Cota	B (m)	$h_{MP}$ (m)	$F = B / h_{MP}$	$h_{CM}$ (m)
d	0.00	983.52	87.50	3.95	22.15	3.00
	87.50	983.52				
c	16.00	983.02	71.00	3.45	20.58	2.50
	87.00	983.02				
b	18.00	982.77	68.00	3.20	21.25	2.25
	86.00					
a	28.00	981.67	57.00	2.10	27.14	1.15
	85.00	981.67				

**Figura 21.** Relaciones de forma vs Profundidad Máxima, estación La Balsa, período Post Salvajina.



En el nivel c, obtenido en la curva en el cual se encuentra el umbral de banca llena, se tiene un nivel con respecto al cero de mira de  $h=2.5m$ . A partir de la ecuación potencial de Nivel de Agua vs Caudal, obtenida para el período Post-Salvajina, se calculó el valor del caudal a banca llena despejando la variable de la ecuación potencial:

$$h = 0.293Q^{0.376}$$

$$Q_{bkf} = \left( \frac{2.5m}{0.293} \right)^{(1/0.376)} = 298.41 \frac{m^3}{s}$$

Para la obtención de los períodos de retorno de los caudales a banca llena obtenidos se utilizó, la distribución de Log Pearson tipo III; según estudios anteriores realizados sobre la corriente del río Cauca por el PMC, esta distribución es la que presenta un mejor ajuste para la serie de máximos caudales registrados. Haciendo uso del software Stormwater Management and Design Aid (SMADA), se obtuvieron los períodos de retorno que más se ajustan a los caudales a banca llena obtenidos en el análisis de cada sección. Los datos se encuentran registrados en la **Figura 22.**

Para la validación de los resultados, se comparan los niveles de banca llena obtenidos en las curvas de calibración, obtenidas para el río Cauca por el grupo de investigación en hidráulica fluvial y marítima, para el PMC en el 2005.

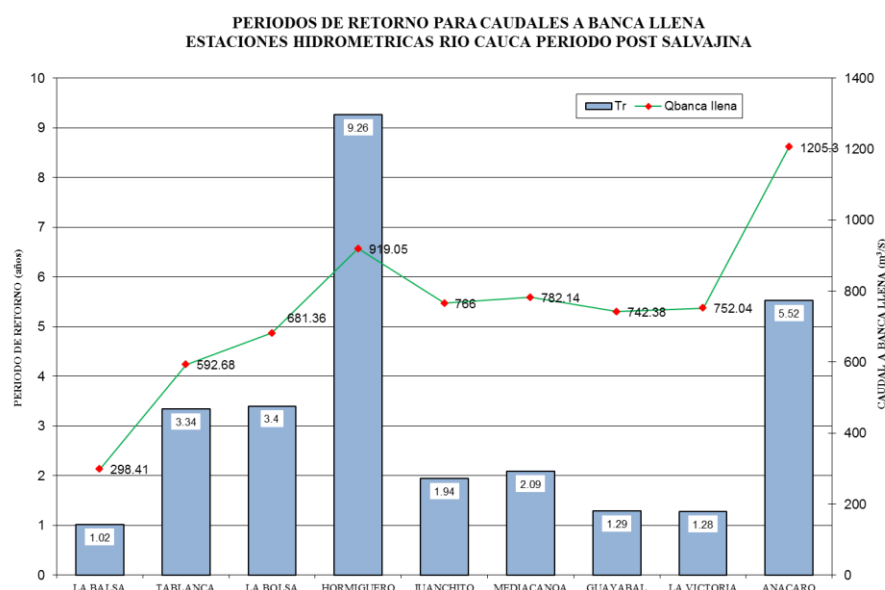
Para la obtención de la variabilidad de los resultados y posible porcentaje de error que puede presentar la estimación del caudal a banca llena, se hace el cálculo del ancho a banca llena de nuevo utilizando para ello la relación potencial obtenida para el ancho en función del caudal y se calcula el error relativo, entre el valor obtenido y el valor tomado directo de las gráficas de las secciones transversales para el ancho a banca llena.



**Tabla 21.** Caudales a banca llena para y períodos de retorno estaciones hidrométricas río Cauca, período Post-Salvajina.

Estación	$Q_{bfk}$	$h_{bkf}$	$h_{bkf}$	% Error	Log Pearson tipo III	
	(m <sup>3</sup> /s )	Calculado	Curvas de Calibración del PMC		Tr	Probabilidad de no excedencia
		(m)	(m)		(años )	
La Balsa	298.41	2.50	3.60	-30.6	1.02	0.02
Tablanca	592.68	3.32	3.50	-5.1	3.34	0.70
La Bolsa	681.36	4.40	4.60	-4.3	3.40	0.71
Hormiguero	919.05	5.89	6.70	-12.1	9.26	0.89
Juanchito	766.00	6.67	6.90	-3.3	1.94	0.49
Mediacanoa	782.14	6.24	8.20	-23.9	2.09	0.52
Guayabal	742.38	5.22	8.40	-37.9	1.29	0.23
La Victoria	752.04	6.35	8.30	-23.5	1.28	0.22
Anacaro	1205.30	7.39	8.20	-9.9	5.52	0.82

**Figura 22.** Caudales a banca llena y períodos de retorno para estaciones hidrométricas sobre el río Cauca para el período Post-Salvajina.



#### 7.7.4 CAUDAL MEDIO

El caudal medio se obtuvo promediando los valores de la serie de caudales medios multianuales, que se obtuvieron de los registros de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca para el período Post-Salvajina. Los resultados se muestran en la **Tabla 22**, junto con el resumen de los caudales característicos utilizados en este estudio.

**Tabla 22.** Caudales característicos en las estaciones hidrométricas sobre el río Cauca para período Post-Salvajina.

Estación	Caudales característicos río Cauca, período Post-Salvajina				
	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>dom</sub>	Q <sub>bkf</sub>	Q <sub>med</sub>
<b>La Balsa</b>	105.3	257.7	201.9	298.4	190.0
<b>Tablanca</b>	110.4	268.0	203.1	592.7	192.0
<b>La Bolsa</b>	132.5	319.2	245.0	681.4	229.0
<b>Hormiguero</b>	141.0	371.9	284.0	919.1	263.0
<b>Juanchito</b>	149.0	398.8	300.0	766.0	284.0
<b>Mediacanoa</b>	175.8	451.0	338.0	782.1	325.0
<b>Guayabal</b>	191.4	529.4	399.7	742.4	379.0
<b>La Victoria</b>	195.5	552.6	316.0	752.0	388.0
<b>Anacaro</b>	200.6	565.1	435.7	1205.3	410.0

### **7.7.5 ANÁLISIS DE LAS RELACIONES REGIONALES DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA PARA EL PERÍODO POST-SALVAJINA**

Las relaciones regionales de geometría hidráulica (o relaciones de geometría hidráulica en dirección aguas abajo) describen las características geométricas en función del caudal a banca llena y el caudal dominante, además de la geometría del canal calculada en función del área de drenaje. Estas relaciones se obtuvieron con base en la información registrada en las estaciones hidrométricas y los resultados de estudios previos realizados en la cuenca del río Cauca, especialmente el Proyecto de Modelación del río Cauca, realizado por el grupo de investigación HIDROMAR de la Universidad del Valle en el año 2005.

Las relaciones regionales de geometría hidráulica se determinan para el período Post-Salvajina, debido a que en dicho período se tomaron las secciones de aforo de las estaciones hidrométricas, con las cuales se calcularon los caudales a banca llena y demás caudales característicos utilizados en este análisis, solo se trabajaron con las variables área, velocidad, ancho y profundidad hidráulica ya que para los valores correspondientes a los caudales a banca llena no hay datos medidos en campo, en la mayoría de las estaciones hidrométricas, por ende se tomaron los valores de las variables hidráulicas con las regresiones potenciales obtenidas para cada estación.

Se obtuvieron ecuaciones de geometría hidráulica hacia aguas abajo de 3 formas, una teniendo en cuenta en área drenaje de cada estación, para el cálculo de las condiciones del cauce lleno, otra considerando las condiciones hidráulicas a banca llena en función del caudal a banca llena y por último las variables hidráulicas anteriormente mencionadas en función del caudal dominante. Por otra parte una de las relaciones regionales o aguas abajo, de mayor utilidad, es el Caudal a Banca Llena vs Caudal Medio; debido a que se puede conocer directamente el valor del caudal de cauce lleno, con los valores del caudal medio anual, que se obtienen de los registros y datos hidrológicos tomados por la CVC. Para esta se construyó una ecuación de

geometría hidráulica, la cual es mostrada en la **Figura 23**. En la **Tabla 23** se muestran los valores correspondientes a las condiciones geométricas para la condición de banca llena, con la cual se obtuvieron las curvas hacia aguas abajo y en la **Tabla 24** se muestran las mismas características hidráulicas pero calculadas para el caudal dominante.

En la **Figura 24, a 26**, se muestran las relaciones regionales de geometría hidráulica Cauca obtenidas para el período Post-Salvajina.

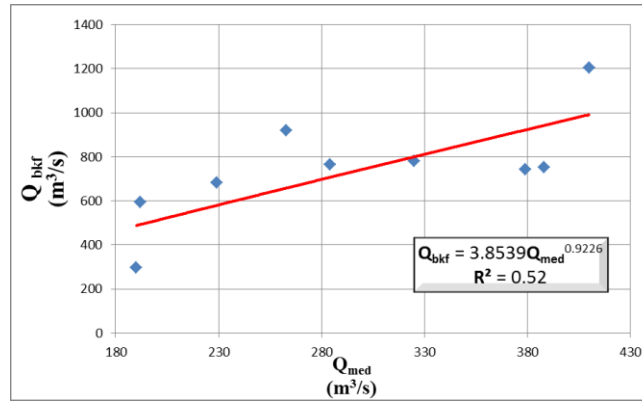
**Tabla 23.** Parámetros hidráulicos a banca llena en las estaciones sobre el río Cauca para el período Post- Salvajina.

Estación	AD ( $\text{km}^2$ )	$Q_{bkf}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$B_{bkf}$ (m)	$D_{bkf}$ (m)	$V_{bkf}$ (m/s)	$A_{bkf}$ ( $\text{m}^2$ )	Abscisa
La Balsa	5111	298.4	71.0	2.5	1.7	172.7	K27+384
Tablanca	5147	592.7	69.5	3.3	2.5	240.1	K37+103
La Bolsa	6099	681.4	99.0	4.4	1.3	523.9	K78+903
Hormiguero	8069	919.0	118.5	5.9	1.6	578.4	K113+484
Juanchito	8556	766.0	94.0	6.7	1.6	482.1	K139+258
Mediacanoa	12118	782.1	103.5	6.2	1.1	733.2	K220+915
Guayabal	15991	742.4	110.8	5.2	1.2	626.9	K347+835
La Victoria	16296	752.0	126.1	6.4	1.1	694.6	K369+874
Anacaro	17199	1205.3	123.2	7.4	1.7	690.1	K416+514

**Tabla 24.** Parámetros hidráulicos calculados para el caudal dominante en las estaciones sobre el río Cauca para el período Post- Salvajina.

Estación	$Q_{dom}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	B (m)	D (m)	V (m/s)	A ( $\text{m}^2$ )	Abscisa
La Balsa	201.9	69.1	2.1	1.3	147.3	K27+384
Tablanca	203.1	59.8	2.7	1.2	163.2	K37+103
La Bolsa	245.0	90.8	3.4	0.8	304.0	K78+903
Hormiguero	284.0	97.1	2.7	1.1	262.7	K113+484
Juanchito	300.0	74.3	3.3	1.2	248.7	K139+258
Mediacanoa	338.0	93.8	4.0	0.9	377.3	K220+915
Guayabal	399.7	107.1	3.8	1.0	407.3	K347+835
La Victoria	316.0	116.3	3.0	0.9	353.2	K369+874
Anacaro	435.7	91.2	4.4	1.4	400.6	K416+514

**Figura 23.** Caudal a banca llena en función del caudal medio en el río Cauca. Tramo La Balsa- Anacaro, período Post-Selvajina.



El resultado anterior muestra que el caudal a banca llena puede ser expresado como una función de tipo potencial del caudal medio, aunque el coeficiente de determinación es superior al valor de 0.5, se podría utilizar la ecuación para tener un indicativo de la magnitud del caudal a banca llena de una sección del río que posea pocos datos históricos.

Los límites de confianza obtenidos para las relaciones regionales de geometría hidráulica, se calcularon mediante la siguiente expresión:

$$P \left[ \hat{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \hat{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha$$

Donde:

$\hat{x}$  = Media aritmética de la población de estudio.

$z_{\alpha/2}$  = El producto del valor crítico.

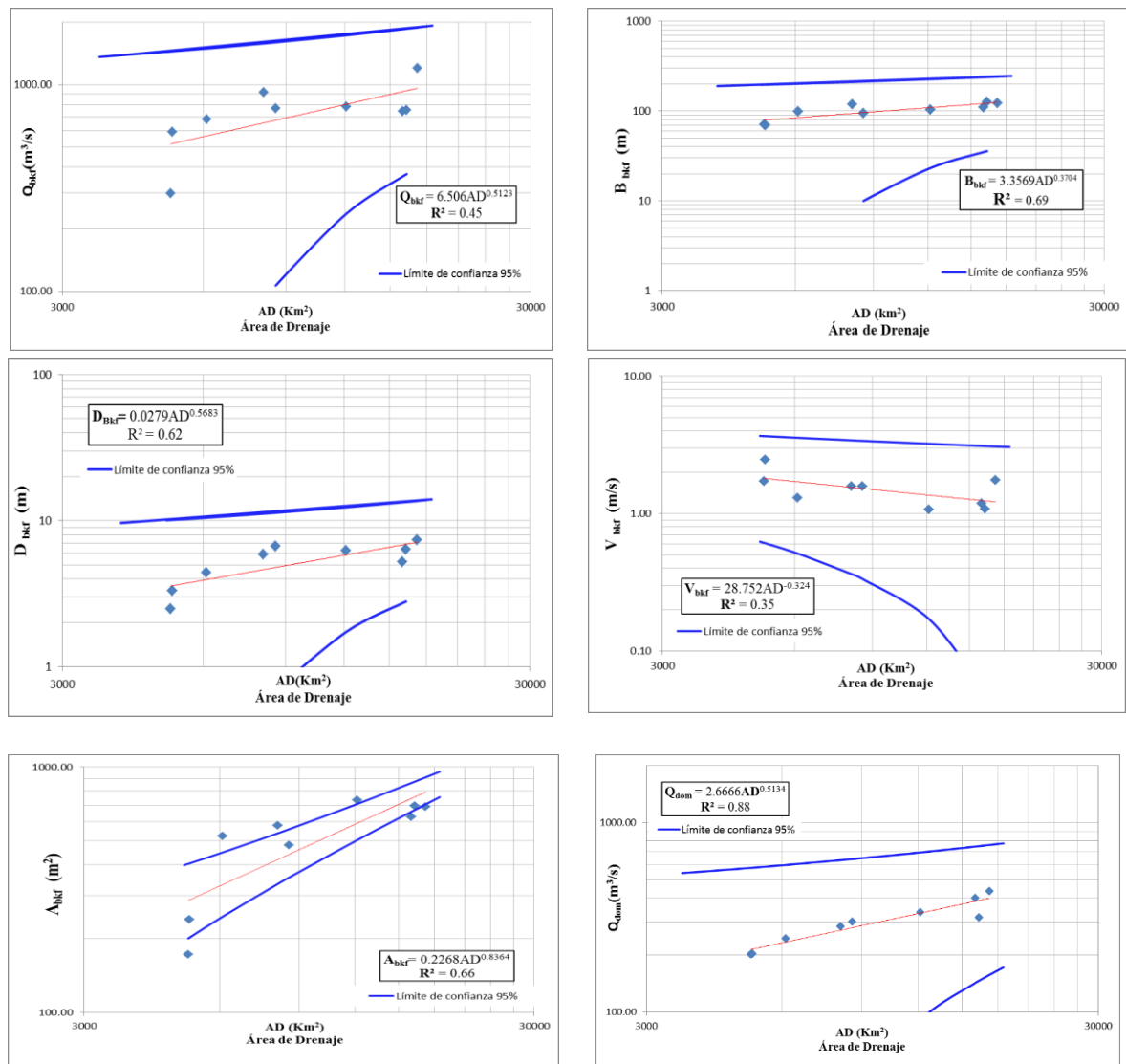
$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  = Error estándar.

$\alpha$  = Grado de significancia.

Con un grado de significancia del 5%, se obtuvo un límite de confianza del 95%, para las variables dependientes en cada ecuación de la geometría hidráulica regional.

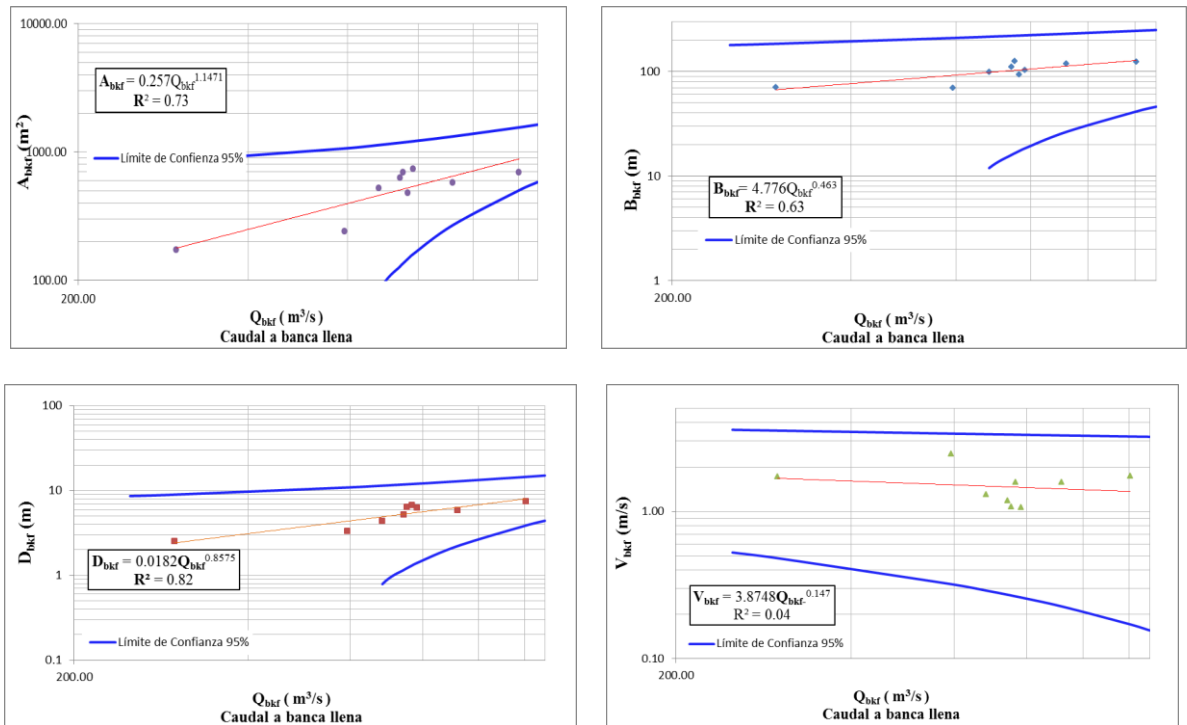
Las relaciones regionales de geometría hidráulica en función de los caudales dominante y a banca llena y el área de drenaje se muestran en la **Tabla 25**. Los mayores coeficientes de determinación se obtuvieron para la profundidad hidráulica en función del caudal a banca llena, seguido del área hidráulica en función del caudal a banca llena y luego el caudal dominante en función del área de drenaje. En conclusión las ecuaciones que pueden ser utilizadas como predictores de los parámetros hidráulicos son las que presentan un coeficiente de determinación aceptable ( $R^2 > 0.5$ ). Por lo anterior, no se recomienda utilizar ninguna de las ecuaciones obtenidas para la velocidad media del agua, ni la ecuación para determinar el caudal a banca llena en función el área de drenaje.

**Figura 24:** Relaciones regionales de geometría hidráulica en función del Área de drenaje para el río Cauca, período Post-Salvajina.

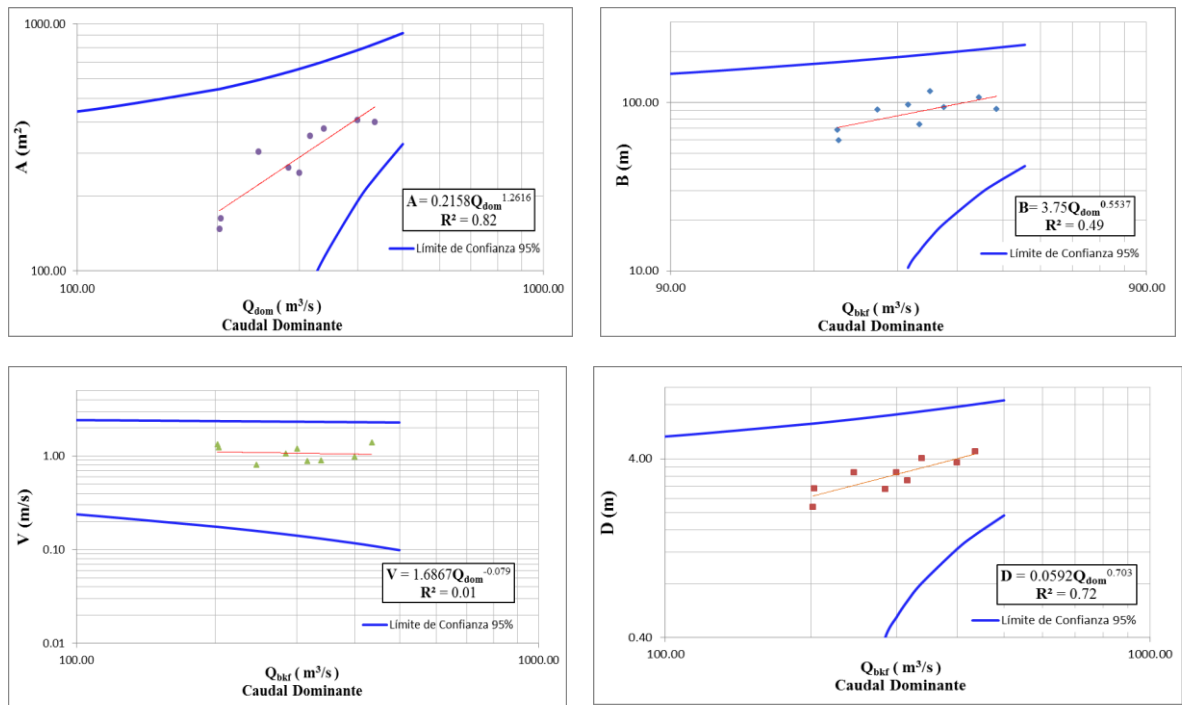


El comportamiento que presenta la velocidad a banca llena en función del área de drenaje es de disminuir magnitud hacia aguas abajo, lo cual se debe principalmente al aumento o disminución de la sección del cauce (debido al aumento de los caudales) y en especial a la disminución de la pendiente hacia aguas abajo.

**Figura 25:** Relaciones regionales de geometría hidráulica en función del Caudal a banca llena para el río Cauca, período Post-Salvajina.



**Figura 26:** Relaciones regionales de geometría hidráulica en función del Caudal dominante para el río Cauca, período Post-Salvajina.



**Tabla 25.** Resumen de ecuaciones de geometría hidráulica aguas abajo para el río Cauca a banca llena, en función del área de drenaje y en función del caudal dominante, período Post- Salvajina.

<b>Relación Regional de geometría hidráulica</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
$Q_{bkf} = 6.506AD^{0.5123}$	0.45
$B_{bkf} = 3.3569AD^{0.3704}$	0.69
$D_{bkf} = 0.0279AD^{0.5683}$	0.62
$V_{bkf} = 28.752AD^{-0.324}$	0.35
$A_{bkf} = 0.2268AD^{0.8364}$	0.66
$Q_{dom} = 2.6666AD^{0.5134}$	0.88
$A_{bkf} = 0.257Q_{bkf}^{1.1471}$	0.73
$B_{bkf} = 4.776Q_{bkf}^{0.463}$	0.63
$D_{bkf} = 0.0182Q_{bkf}^{0.8575}$	0.82
$V_{bkf} = 3.8748Q_{bkf}^{-0.147}$	0.04
$A = 0.2158Q_{dom}^{1.2616}$	0.82
$B = 3.75Q_{dom}^{0.5537}$	0.49
$D = 0.0592Q_{dom}^{0.703}$	0.72
$V = 1.6867Q_{dom}^{-0.079}$	0.01

#### **7.7.6 VARIACIÓN DE LAS RELACIONES REGIONALES DE GEOMETRÍA HIDRAULICA PARA EL RÍO CAUCA EN SU VALLE ALTO EN EL PERÍODO POST-SALVAJINA.**

En el análisis de las variables hidráulicas, geométricas y sedimentológicas del río hacia aguas abajo se utilizó la información de los aforos disponibles en las estaciones hidrométricas para el período Pos-Salvajina. De estos aforos se extrajo el valor de las variables hidráulicas, para los caudales característicos definidos anteriormente, como son el caudal para una duración del 80% y el caudal con una duración del 20%, es decir los caudales que son excedidos el 80% y el 20% del tiempo respectivamente. Estos valores se muestran en las **Tablas 26 y 27**. Con los valores obtenidos se determinaron las curvas de variación hacia aguas abajo para el tramo de estudio comprendido entre la estación La Balsa y Anacaro, para el cual se obtuvieron las gráficas (cuadriláteros), que explican las variaciones de las características hidráulicas, geométricas y sedimentológicas teniendo en cuenta los dos porcentajes de duración de caudales establecidos. En la **Figura 27**, se muestran las gráficas de las variaciones aguas abajo para los parámetros hidráulicos.

**Tabla 26.** Valores del Ancho, Profundidad Hidráulica, Velocidad y Área para caudales de 80% y 20% de duración para el río Cauca, período Post- Salvajina.

Estación	Caudales Característicos Post-Salvajina		B (m)		D (m)		V (m/s)		A (m <sup>2</sup> )	
	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>
La Balsa	105.3	257.7	67.4	70.8	1.8	2.4	0.9	1.6	117.6	170.0
Tablanca	110.4	268.0	59.2	59.8	2.2	3.0	0.8	1.5	132.0	181.2
La Bolsa	132.5	319.2	89.5	91.1	2.4	3.9	0.6	0.9	213.6	357.4
Hormiguero	141.0	371.9	87.0	92.4	2.1	3.4	0.8	1.2	180.8	312.5
Juanchito	149.0	398.8	69.2	77.7	2.3	4.0	0.9	1.3	156.8	310.1
Mediacanoa	175.8	451.0	91.1	95.6	2.6	5.0	0.7	1.0	238.3	474.2
Guayabal	191.4	529.4	102.7	109.5	2.5	4.6	0.7	1.0	259.1	506.0
La Victoria	195.5	552.6	112.2	122.2	2.2	4.6	0.8	1.0	242.4	566.1
Anacaro	200.6	565.1	83.5	91.2	2.4	4.4	1.0	1.4	197.8	400.6

**Tabla 27.** Valores del Perímetro Mojado, Radio Hidráulico, Factor de forma, Nivel de Agua, Número de Froude y Sólidos en Suspensión para caudales de 80% y 20% de duración para el río Cauca, período Post-Salvajina.

Estación	Caudales Característicos Post-Salvajina		P (m)		R (m)		F		h (m)		F <sub>r</sub>		S <sub>s</sub> ( Ton /día )	
	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>	Q <sub>80%</sub>	Q <sub>20%</sub>
La Balsa	105.3	257.7	70.9	75.6	1.7	2.3	39.0	29.9	1.7	2.5	0.22	0.34	711.3	3786.6
Tablanca	110.4	268.0	63.7	65.9	2.1	2.8	26.6	19.8	0.9	1.7	0.18	0.27	-	-
La Bolsa	132.5	319.2	94.3	99.0	2.3	3.6	38.0	23.3	0.9	2.0	0.13	0.15	-	-
Hormiguero	141.0	371.9	91.1	99.2	2.0	3.2	43.0	27.4	0.7	2.1	0.18	0.21	1169.8	9678.4
Juanchito	149.0	398.8	73.8	85.7	2.1	3.6	30.8	19.5	1.2	3.3	0.20	0.21	1357.4	11528.8
Mediacanoa	175.8	451.0	96.3	105.4	2.5	4.5	35.1	19.3	2.1	4.2	0.15	0.14	2322.4	18260.5
Guayabal	191.4	529.4	107.8	118.7	2.4	4.3	40.8	23.7	1.2	3.7	0.15	0.16	2415.6	21930.6
La Victoria	195.5	552.6	116.5	131.4	2.1	4.3	52.0	26.4	2.1	4.9	0.18	0.15	2548.0	22002.2
Anacaro	200.6	565.1	88.3	100.0	2.2	4.0	35.3	20.8	1.7	4.0	0.21	0.21	2767.1	29330.7

Del análisis realizado a los parámetros hidráulicos y geométricos del río Cauca en el tramo de estudio La Balsa-Anacaro se destacan los siguientes aspectos:

El tramo donde hay un mayor cambio del ancho de la sección es Tablanca-La Bolsa donde existe un aumento del 51.2% para un misma duración del caudal, en el tramo que tiene el mayor decrecimiento en el ancho es La Victoria-Anacaro en donde el ancho se redujo 25,5% para una duración del 80%. El ancho en Anacaro es menor que en las estaciones Mediacanoa, Guayabal y La Victoria, lo cual no representa un comportamiento usual ya que esta estación se encuentra localizada aguas abajo en el tramo de estudio, esto puede ser debido a que presenta restricciones en sus taludes ya que la estación se encuentra restringida contra la movilidad lateral por lo cual no se ajusta al cambio del caudal.

Las estaciones que aumentan más rápidamente su ancho, al aumentar la descarga son Juanchito, La Victoria y Mediacanoa respectivamente. Este hecho se encuentra explicado por la geometría de la sección transversal, pues las estaciones que poseen formas trapezoidales aumentan su ancho en mayor magnitud si se compara con las secciones transversales que poseen una forma más rectangular, es decir que las pendientes de los taludes son casi verticales.



**Figura 27.** Relaciones regionales de geometría hidráulica en el río Cauca en su valle alto en el período Post- Salvajina.

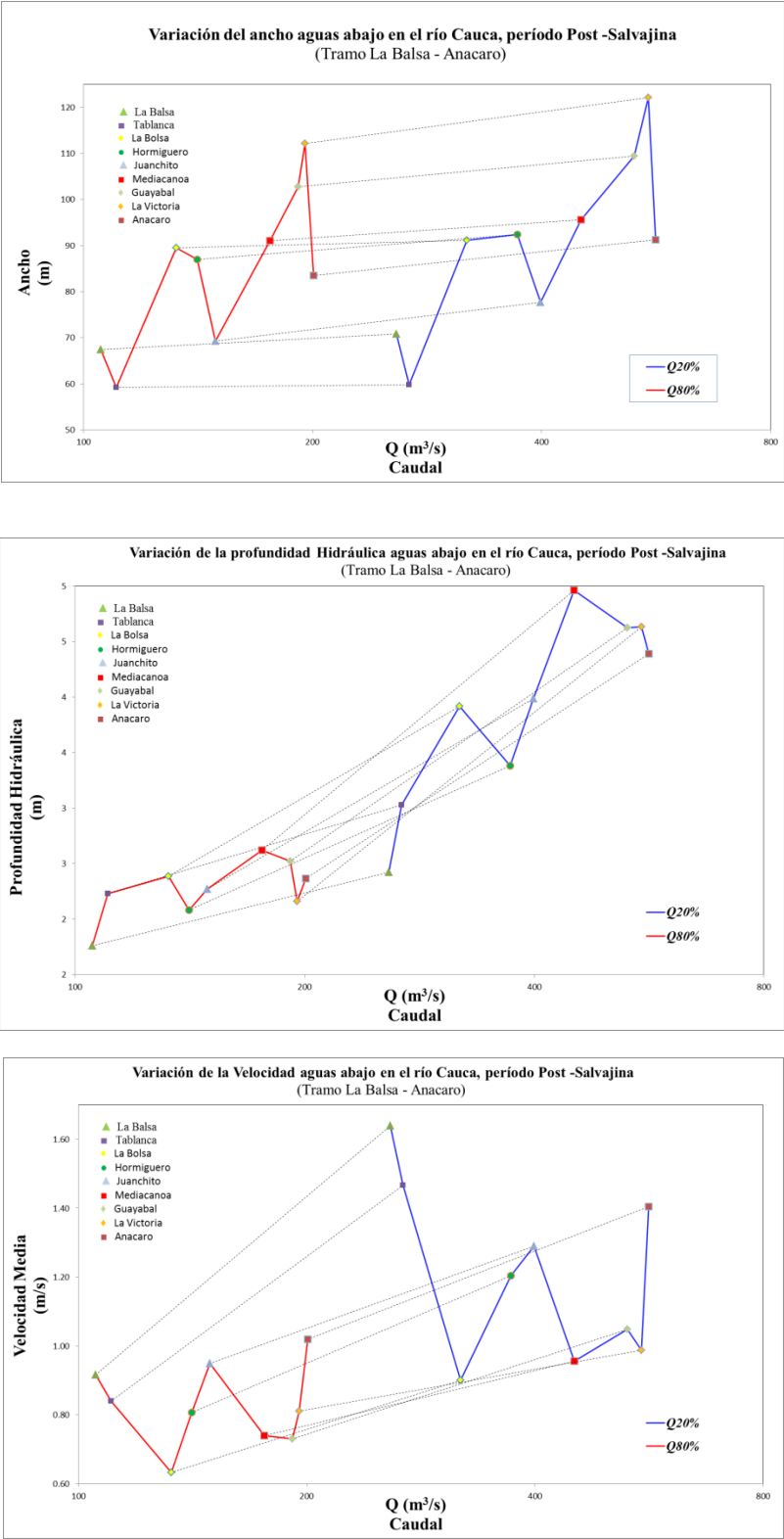
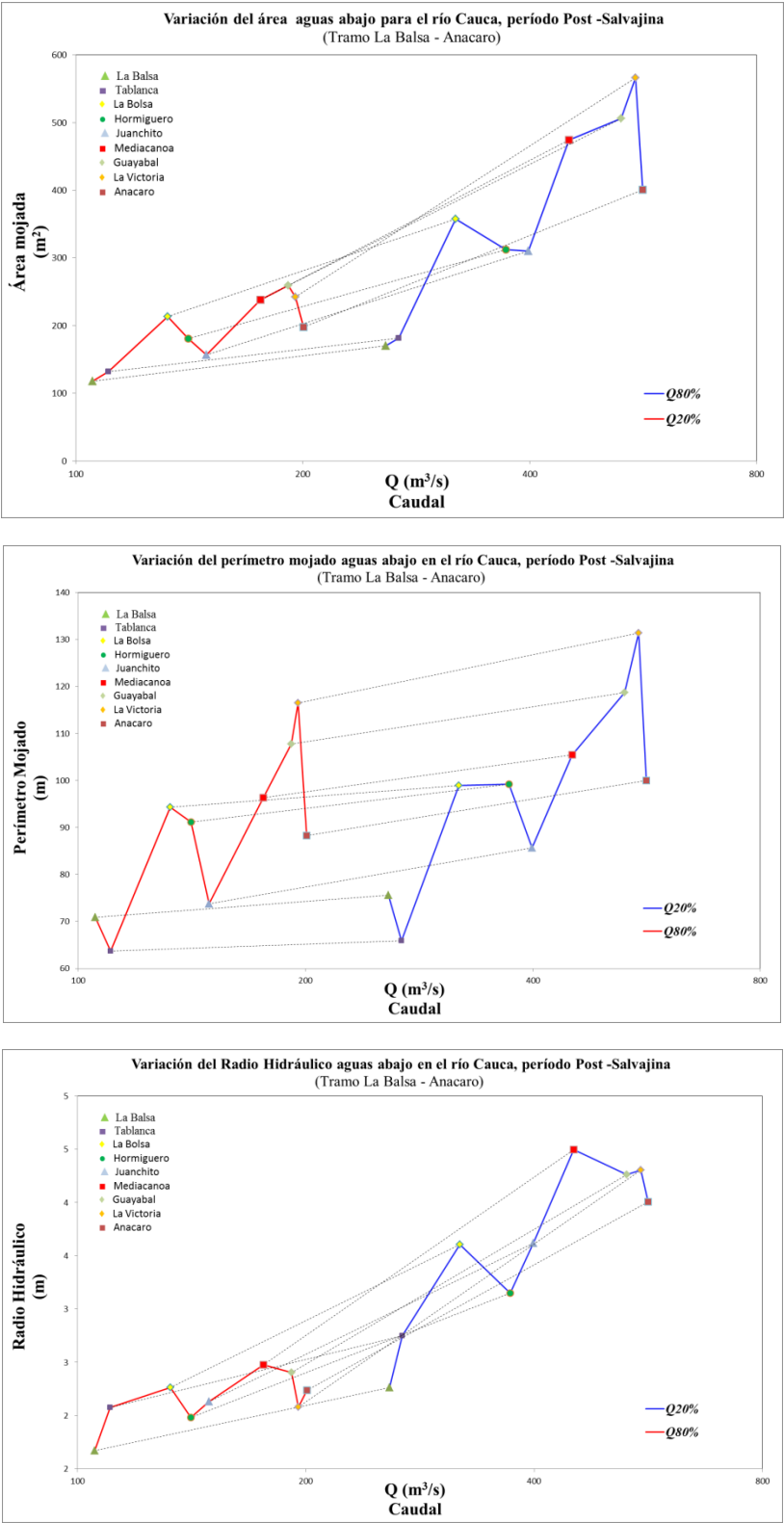
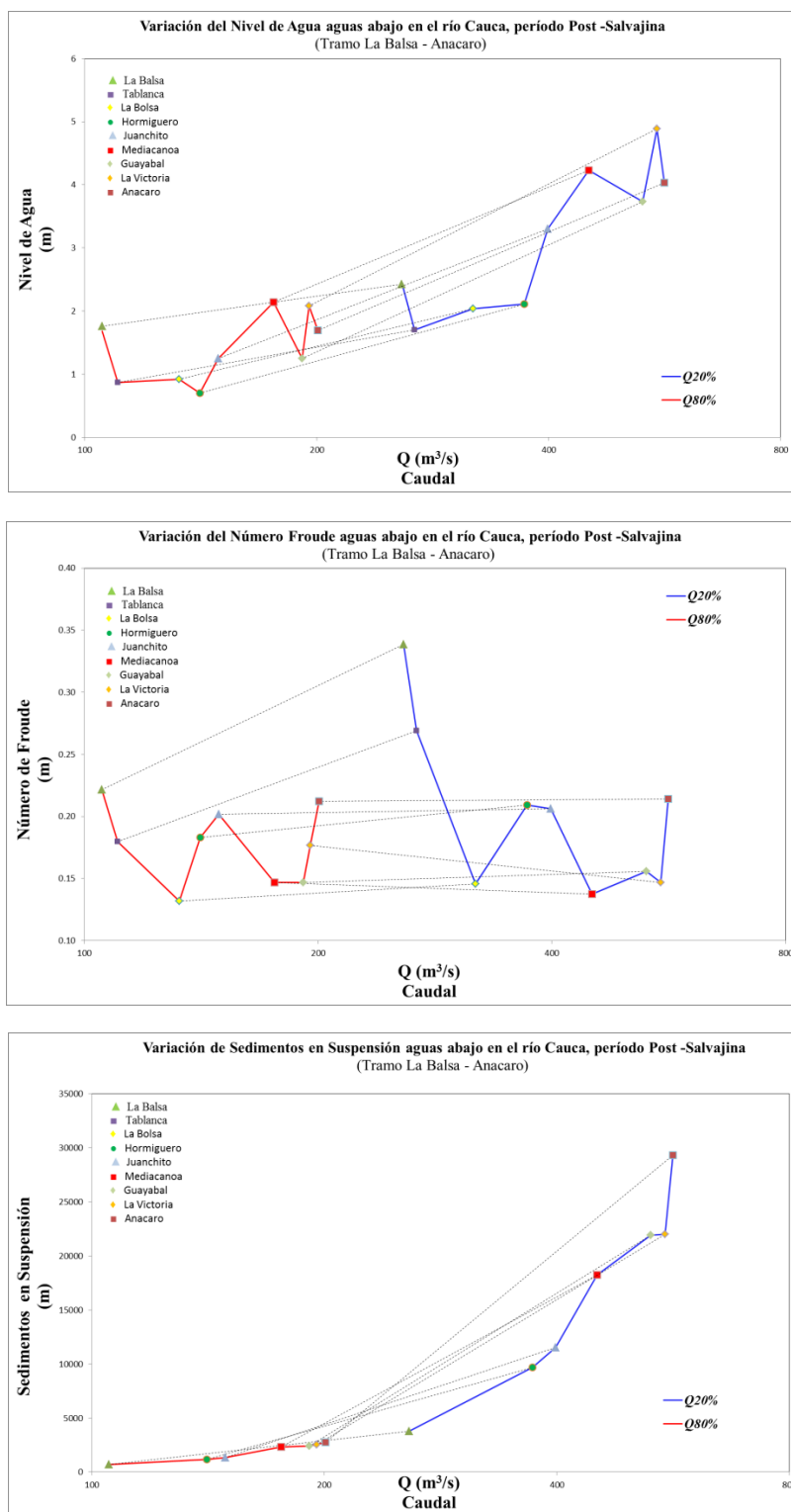


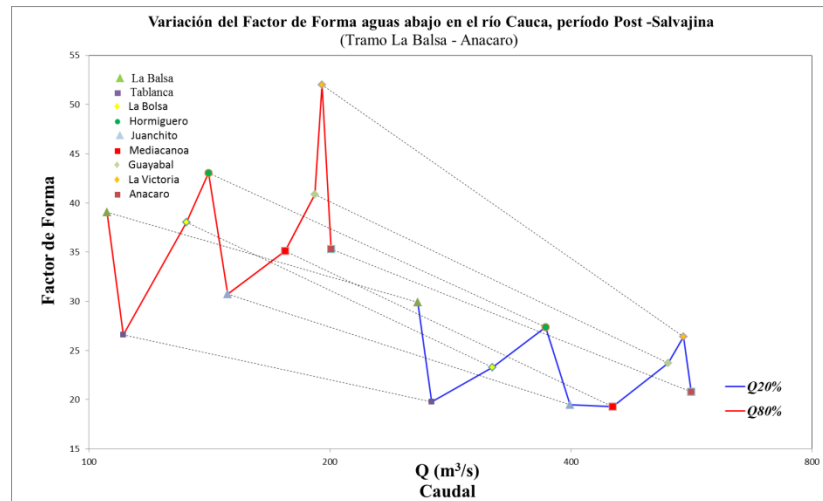
Figura 27. Relaciones regionales de geometría hidráulica en el río Cauca en su valle alto en el período Post- Salvajina (cont.).



**Figura 27.** Relaciones regionales de geometría hidráulica en el río Cauca en su valle alto en el período Post- Salvajina (cont.).



**Figura 27.** Relaciones regionales de geometría hidráulica en el río Cauca en su valle alto en el período Post- Salvajina (cont.).



La mayor profundidad hidráulica se presenta en la estación Mediacanoa, lo que puede ser consecuencia del aumento en la socavación del lecho que está en función de la resistencia a la erosión de los suelos del fondo. En el análisis comparativo de los resultados obtenidos en las 9 estaciones se observa que la profundidad disminuye en los tramos La Bolsa- Hormiguero en un 13% y en el tramo Guayabal- La Victoria en un 14.3% ambas para un caudal de 80% duración.

El mayor cambio en la profundidad hidráulica para la misma duración del caudal, se registra entre las estaciones La Bolsa y Tablanca donde existe un aumento del 27%. La estación que aumenta de profundidad más rápidamente con el tránsito de caudales de distinta duración Mediacanoa, seguida por La Bolsa, La Victoria.

El comportamiento del área en dirección aguas abajo no tiene una tendencia creciente o decreciente, es decir que en algunos tramos como La Bolsa- Juanchito disminuye 22%, mientras que la mayor disminución del área es en el tramo Guayabal-Anacaro donde es del orden del 41% para una duración del 80%. El mayor valor de área hidráulica se registra en la estación Guayabal para una duración del 80%, mientras que para una duración del 20% la mayor área la presenta la estación La Victoria debido a que la mayor tasa de aumento del área la posee la estación La Victoria, seguido de la estación Mediacanoa y Guayabal.

La mayor velocidad media de flujo se presenta en la estación La Balsa, que se encuentra ubicada en la parte inicial del tramo de estudio. El comportamiento de esta variable es decreciente en los tramos La Balsa-La Bolsa y entre las estaciones Juanchito – Guayabal. La estaciones que poseen mayor tasa de aumento de la velocidad, según el aumento del caudal son La Balsa, Hormiguero y La Bolsa, las cuales se encuentran ubicadas en la parte inicial del tramo de estudio, por lo cual poseen pendientes de fondo superiores por lo cual se generan mayores velocidades.

El perímetro mojado de la sección transversal presenta un comportamiento análogo al ancho de la sección debido a que el río Cauca, es un canal suficientemente ancho en donde el valor del

ancho es mucho mayor que el valor de la profundidad, por lo cual el valor del perímetro mojado depende en gran parte del valor del ancho.

El radio Hidráulico de las secciones transversales está controlado por el valor del área mojada, pues este es mayor en magnitud al valor del ancho superior, por lo cual el comportamiento de esta variable es similar al comportamiento del área mojada de la sección.

El comportamiento del factor de forma en general es decreciente, este disminuye para cada sección con el aumento del caudal, pues los aumentos en la profundidad son más significativos que el aumento en el ancho de cada sección. La estación que posee el mayor factor de forma es La Victoria.

El nivel de agua se obtuvo en la estación Mediacanoa, pues este resultado está ligado al comportamiento de la profundidad hidráulica, esta variable no presenta un comportamiento creciente en dirección aguas abajo debido a la variación en la forma de las secciones. Este parámetro hidráulico decrece en el tramo La Balsa: Hormiguero y entre las estaciones Mediacanoa y Guayabal.

La tendencia de los valores del número de Froude es similar al comportamiento que posee la velocidad, pues esta variable está condicionada por el valor de la velocidad en cada sección. Los valores encontrados para todas las secciones se encuentran entre 0 y 1, lo que indica que el valle alto del río Cauca tiene un estado de flujo permanente subcrítico.

La carga de sedimentos en suspensión posee un comportamiento creciente, en el tramo de estudio, debido a que aguas abajo las estaciones reciben mayores contribuciones del caudal y carga de sedimentos de los ríos tributarios; lo que indica que un aumento del caudal es directamente proporcional al aumento de la carga de sedimentos.

La sección en la cual el aumento de la carga de sedimentos es mayor para las dos duraciones de caudal usadas en los cálculos, es la estación Anacaro que se encuentra en la parte final del tramo de estudio. En mayor aumento de la carga de sedimentos se haya entre las estaciones La Victoria y Anacaro.

La forma en la que se comportan las características hidráulicas y geométricas dan la explicación de la irregularidad morfológica que posee el cauce del río Cauca en su valle alto, pues no se presentan en todos los casos los comportamientos crecientes de los parámetros hidráulicos en dirección aguas abajo, y eso a su vez manifiesta el grado de perturbación que posee el río a su paso por el Valle del Cauca y principalmente la mala localización de la mayoría de las estaciones hidrométricas puesto que se encuentran en sitios controlados artificialmente por obras civiles como tablestacados y estribos de puentes, que impiden que el cauce se ajuste al régimen de caudales (al menos en el sentido horizontal). Afectando de esta manera el comportamiento de todas las variables hidráulicas.

## 8. CONCLUSIONES

En el presente estudio se determinaron las relaciones de geometría hidráulica para el río Cauca en el tramo comprendido entre el embalse de Salvajina, localizado al norte del departamento del Cauca, y el municipio La Virginia, localizado en el departamento de Risaralda, a partir de los datos y registros disponibles en las estaciones hidrométricas existentes en este sector.

Considerando que en el año de 1985 entró en operación la represa de Salvajina, la cual alteró el régimen natural de los caudales en el río Cauca, modificando, por ende, sus características hidráulicas, sedimentológicas y morfológicas, se determinaron las relaciones de geometría hidráulica para los períodos Pre- Salvajina y Post Salvajina, adicionalmente se determinaron las relaciones para todo el período de registros disponibles, en las diferentes estaciones hidrométricas existentes en el río Cauca. No obstante, la mayoría de los diferentes análisis y evaluaciones se enfocaron al período Post- Salvajina porque estas representan el comportamiento del actual del río como resultado del régimen artificial de caudales impuesto por la operación del embalse para satisfacer sus diferentes propósitos de generación de energía, regulación de caudales durante las crecientes del río y alivio de la contaminación en los periodos de verano.

Finalmente debe mencionarse que la estación de Tablanca, localizada 37.1 Km aguas abajo de la represa de Salvajina quedó, fuera de servicio en diciembre del 2010 debido al corte del meandro en el sector del corregimiento de Robles (municipio de Jamundí), en donde se hallaba la estación. Las conclusiones más destacadas en el estudio son las siguientes:

Caracterización hidráulica, hidrológica, geomorfológica y sedimentológica del río:

- Es importante resaltar la importancia de la actividad antrópica en la cuenca, que para el río Cauca representa unos de los aspectos más importantes y de mayor interés, puesto actos como la urbanización de la cuenca, así como la gestión sobre los ríos tributarios del Cauca, afectan de manera directa las características del cauce del río. Un ejemplo de esto, es la extracción de materiales del lecho del río utilizados en la construcción, que genera cambios en la zona directa de extracción, así como aguas abajo, debido a que esta actividad genera la geometría del cauce un aumento en las profundidades en la zona de extracción, modificaciones de la velocidad del flujo, cambios en la rugosidad del lecho y mayor transporte de sedimentos en la zona afectada.
- La estación Hidrométrica Suárez es la más carente de información hidrológica y de sedimentos pues solo cuenta con datos para el períodos Post- Salvajina, sin embargo los datos de esta estación se tuvieron que excluir de los análisis de las relaciones generales por estación, y también de los análisis aguas abajo, debido a que no se pudo estimar un

caudal a banca llena, porque la geometría de la sección presenta una gran capacidad de conducción de flujo, por ende el caudal obtenido, está por fuera del rango de caudales obtenidos para las otras estaciones. Por último, en la estación Suárez no se pudo obtener la información referente al caudal dominante pues no cuenta con una curva de duración de caudales diarios para el período Post-Salvajina.

Determinación del caudal a banca llena, el caudal dominante y sus respectivos períodos de retorno:

- El caudal a banca llena por ser un caudal de gran magnitud para las estaciones hidrométricas, no posee datos medidos en campo. Puesto que es dificultoso estimar el día en el que se presenta dicho caudal y tomar aforos resulta peligroso para las comisiones que realizan este trabajo.
- Para la obtención de los límites de las bancas de cada sección transversal, es indispensable información topográfica detallada de la misma, puesto que la estimación del caudal a banca llena está en función de esta información y en cuanto se tenga información más precisa se calculan los caudales con menor margen de error.
- Para la obtención de los períodos de retorno es pertinente usar la distribución de probabilidad que más se ajuste a las condiciones del cauce, según la experiencia existente de estudios realizados en el río se debe utilizar la distribución Log Pearson tipo III, para el cálculo de los períodos de retorno de los caudales.
- El valor promedio de períodos de retorno de los caudales a banca llena de las estaciones hidrométricas del río Cauca es 3.2 años, lo cual contrasta con los valores encontrados en 1978 por Dunne y Leopold, los cuales indican que los valores del período de retorno para los caudales usados en las relaciones de geometría hidráulica aguas abajo, deben encontrarse entre 1 y 2 años presentando una media de 1,5 años. Lo anterior es el resultado de múltiples factores, como pueden ser la variación de la pendiente del cauce, las diferentes intervenciones a que viene siendo sometido el río, los aportes de los tributarios, etcétera.

Selección del tipo de modelo de geometría hidráulica y determinación de la geometría hidráulica en las diferentes estaciones hidrométricas y hacia aguas abajo en el río Cauca:

- El río Cauca por ser un río de valle, es un río aluvial que ha alcanzado en algunos tramos secciones de cauce estable, es por ello que la utilización del modelo de geometría hidráulica basado en las regresiones de tipo potencial, que sugiere la teoría de régimen promulgada por Leopold y Maddock en 1953, es la más adecuada para predecir las condiciones hidráulicas del río Cauca.

- En las validaciones de las relaciones de geometría hidráulica en estación, se obtienen buenos resultados, es decir que presentan un error moderadamente bajo, debido a que varias de las estaciones hidrométricas representan secciones de cauce estable, lo que contribuye a que se puedan expresar las características hidráulicas, hidrológicas y sedimentológicas del río en función del caudal.
- Las ecuaciones en las cuales el coeficiente de determinación es inferior a 0.5, se tiene que menos del 50% de los datos utilizados en la regresión como variable dependiente (ancho, profundidad hidráulica, velocidad, área, sólidos en suspensión, radio hidráulico, perímetro mojado, número de Froude, relación de forma y nivel de agua) según sea el caso, está representado por el caudal, por lo cual la ecuación obtenida no puede ser utilizada como predictor para el parámetro hidráulico, geométrico o sedimentológico en cuestión.
- Muchas de las estaciones de medición al parecer se encuentran localizadas en zonas donde hay puentes sobre el río, en los cuales se hallan tablestacados, por ende el ancho no varía o varía muy poco (generalmente) al variar el caudal.
- Las relaciones de geometría hidráulica obtenidas para el período General no deben ser usadas para el cálculo de los parámetros hidráulicos; aun así presenten buenos coeficientes de determinación, estos no representan las condiciones actuales del río, pues al generar las regresiones con todos los datos en un período continuo, se omite el efecto que produce la represa de Salvajina en el río Cauca.
- Los coeficientes y exponentes de las estaciones difieren ampliamente lo que indica que el río Cauca posee una geometría de cauce irregular, lo cual es producto de las características de la cuenca, los tributarios y el área de drenaje hasta cada estación.
- No todas las características hidráulicas del río Cauca presentan un comportamiento creciente, la relación de forma y el número de Froude decrecen con el aumento del caudal en el análisis por estación, es por ello que las ecuaciones obtenidas presentan exponentes negativos.
- Para el cálculo de las ecuaciones de geometría hidráulica aguas abajo, se debe hacer uso de un caudal característico que tenga efectos en la geometría del canal, sea el caudal dominante o el caudal a banca llena. A parte el caudal debe poder estimarse en sitios que no se encuentren instrumentados, para que las ecuaciones resultantes sean de uso general en el tramo de estudio.
- Para el río Cauca las relaciones regionales que mayor coeficiente de determinación tienen, son las que se calcularon en función del área de drenaje y las calculadas en función del caudal a banca llena, de los cuales se exceptúan las relaciones potenciales



calculadas para la velocidad que en general dan coeficientes de determinación muy bajos.

- Las variaciones aguas abajo de los parámetros hidráulicos no presentan por lo general un comportamiento creciente, según indica las consideraciones teóricas que dicen que en la dirección aguas abajo, la tendencia de todo río es la de aumentar sus características hidráulicas.
- Para aumentar la precisión de las ecuaciones de geometría hidráulica, es necesario obtener funciones potenciales multiparamétricas, para poder describir parámetros que se encuentran en función de varias variables, como ejemplo la velocidad, que se encuentra en función del caudal, la rugosidad y el tamaño de sedimento.
- La forma en la que se comportan las características hidráulicas y geométricas dan la explicación de la irregularidad morfológica que posee el cauce del río Cauca en su valle alto, pues no se presentan en todos los casos los comportamientos crecientes de los parámetros hidráulicos en dirección aguas abajo, y eso a su vez manifiesta el grado de perturbación que posee el río a su paso por el Valle del Cauca y la mala ubicación de algunas estaciones hidrométricas, pues no son secciones idóneas para representar el comportamiento hidráulico del río.

Análisis y comparación de las relaciones potenciales obtenidas para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina:

- Del análisis comparativo de las relaciones de geometría hidráulica en estación concluye que el tramo comprendido entre las estaciones La Balsa y Hormiguero, es el que presenta mayor variabilidad de los exponentes para los períodos analizados, lo que indica que ese tramo del río, aún se encuentra desequilibrado ante el nuevo régimen de caudales artificiales impuestos por la represa de Salvajina, resaltando que la estación Hormiguero es la más inestable de todas las estaciones hidrométricas.
- La variabilidad de los exponentes de las ecuaciones de geometría hidráulica obtenidos para los períodos Pre-Salvajina y Post-Salvajina indican los efectos de la regulación que genera la represa, ya que al ser afectado el régimen de los caudales, se modifican las condiciones hidráulicas, morfológicas y sedimentológicas del río.

## 9. RECOMENDACIONES

El estudio se realizó considerando la información disponible de las diferentes estaciones hidrométricas existentes en el río Cauca en su valle alto, la mayoría de las cuales se encuentran en sitios donde se tienen puentes. Estas secciones generalmente son relativamente estables, pero podrían no ser las más representativas del comportamiento del río en los sectores donde se encuentran debido a la restricción que se tienen generalmente en los puentes para la construcción de la estructura de prevención de sus bancas (casi siempre tablestacados). Por lo anterior es recomendable la implementación de nuevas estaciones hidrométricas en tramos relativamente estables pero donde no existan obras de protección o de cualquier índole. Los aforos en estas estaciones se podrían hacer empleando embarcaciones, o mejor desde tarabitas construidas para este propósito.

Igualmente se recomienda la instalación de estaciones hidrométricas menos espaciadas entre sí, pues en la actualidad las distancias entre algunas estaciones consecutivas son muy grandes; por ejemplo entre las estaciones Juanchito y Mediacanoa la distancia es 81 Km, entre las estaciones Mediacanoa y Guayabal es 126 Km y entre las estaciones La Balsa y La Bolsa es 51 Km. Lo anterior teniendo en cuenta la gran dinámica espacial y temporal que presenta el río Cauca en su paso por el departamento del Valle del Cauca, que se refleja en la variabilidad y comportamiento de las características hidráulicas, geométricas y sedimentológicas del río.

Para la elaboración de ecuaciones multiparamétricas que definan las variables hidráulicas con un grado de precisión más alto, es necesario información adicional que tiene que ver con sedimentología y niveles de agua para las condiciones a banca llena. Para lo cual es recomendable que se tomen aforos líquidos, sólidos e información de los suelos del fondo y los taludes del río a fin de poder correlacionar correctamente la información, acerca de las rugosidades y transporte de sedimentos en las ecuaciones de geometría hidráulica.

Para que la información consignada tanto en las curvas de calibración como en las relaciones de geometría hidráulica sea más veraz con las condiciones físicas del río se debe validar los niveles de banca llena, con las condiciones morfológicas del cauce analizando la vegetación, los suelos y la transición de rugosidades en el terreno en las bancas del canal, a fin de poder validar la información básica existente.

Como posible línea de investigación en el campo de la geometría hidráulica del Valle del Cauca, sería pertinente la elaboración de las relaciones potenciales de las corrientes tributarias del río Cauca, así como obtener relaciones multiparamétricas para cada tributario que involucre el caudal y las pendientes hidráulicas con el área de drenaje de cada estación para tener una representación más completa de las condiciones hacia aguas abajo del río Cauca.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Brush, L. M., Jr., 1961, Drainage basins, channels and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania: U.S. Geol. Survey Prof. P282F.
- Carlston, C.W., 1969, Downstream variations in the hydraulic geometry of stream, *American Journal of science*, v.267.
- Darby, S., 2005. Refined Hydraulic Geometry data for British gravel – bed rivers. ASCE, *Journal of hydraulic engineering*. Vol 131, Issue 1, pp. 60-64.
- Dudley, R.W., 2004. Hydraulic Geometry relationship for rivers in coastal and central Maine. U.S Geological survey. Augusta Maine.
- Hack, J. T., 1957, Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U.S Survey Prof. P294B.
- Henderson, F.M., 1961, Stability of Alluvial Channels: *Am Soc Civil Engrs. Proc.*, v. 87 *Journ. Hydr.*, pp. 109-138.
- Harman, W.H., Wise, D.E., Walker, M.A., Morris, R., Cantrell, M.A., Clemmons, M., Jennings, G.D., Clinton, D., Patterson, J., 2001, Bankfull regional curves for North Carolina mountain streams.
- Knigton, D., 1975 *Fluvial form and processes*, London Arnold.
- Lacey, G., 1930. Stable Channel in alluvium. *Proc Inst. Civil Engrs. London England*. Vol-229.
- Langbein, W.B.:1960, A theory for river channel adjustment: *Am Soc. Civil Engrs. Trans.*, in press.
- Leopold, L.B., and Langbein, W.B., 1962, The concept of entropy in landscape evolution: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 500-A.
- Leopold, L., Maddock, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications” U.S. Geol. Survey Prof. Paper 252, 57 p.
- Leopold, L., Wolman, G., and Miller, J. 1964. *Fluvial processes in geomorphology*, Dover publications, New York.
- Mackey, P., Barlow, P.M., Ries, K.G., III, 1998, Relations between discharge and wetted perimeter and other hydraulic-geometry characteristics at selected streamflow-

- gaging stations in Massachusetts: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4094, 44 p.
- Mackin, J.H., 1963 Rational and empirical Methods of investigation in geology, in Albitron , C.C ed. The fabric of geology.
- McCandless, T.L. y Everett, R., 2002, Maryland river survey—Bankfull discharge and channel characteristics of streams in the Piedmont hydrologic region: U.S. Fish and Wildlife Service Chesapeake Bay Field Office Reporte, CBFO-S02-01, 175 p.
- Mejía Sierra, Gloria Jenny, 2001. Aplicabilidad de las Ecuaciones del Régimen a las corrientes de la zona Andina. Tesis de Magister, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Nixon, M. 1959. "A study of the bankfull discharges of rivers in England and Walles", paper No 6233 for discussion at an ordinary meeting, Colorado State University.
- Parker, G., Hydraulic geometry of active gravel rivers, J. Hydraul. Eng., 105, 1185-1201, 1979.
- Pettis, C.R., 1937, Discussion of stable channels in erodible material, By E.W Lane: Transactions of the American soc. Of civil engrs. V.102.
- Posada, L., Mejía, G. 2002. Geometría Hidráulica para corrientes estables de la zona andina colombiana. XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología – Medellín.
- Proyecto Modelos del Río Cauca –PMC. Universidad del Valle – CVC. 1997-2005.
- Richards, K. S., 1982, "Rivers: From and Processes in Alluvial Channels". Methuen, 358 Pg.
- Rosgen, D.L., 1996, Applied River Morphology, Pagosa Springs, Colorado, Wildland Hydrology Books, 390 p.
- Schumm, S. A., 1956, Evolution of drenaje systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey: Geol. Soc. Am. Bull., v. 67, pp.597-646.
- Smith, T.R.1974, A derivation of the Hydraulic Geometry of steady state channels from conservation principles and sediment transport laws: Journal of geology. V.82.
- Simons. D.B., and Alberston M.L., 1963. Uniform water conveyance channel in alluvial material. Trans ASCE.
- Thornes, J.B., 1970, Observations on the dissolved soils.

Wolman , M.G., 1955, The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania: U.S. Geol. Survey Prof. p271.

Wolman, M.G., and Brush, L.M., Jr., 1961, Factors controlling the size and shape of stream channels in coarse noncohesive sands: U.S. Geol Survey Prof. Paper 282 G, pp. 183-210.

Williams, G.P., 1978, Hydraulic-geometry of river cross sections—Theory of minimum variance: U.S. Geological Survey Professional Paper 1029, 4.

Zuluaga, M., y G. Poveda, Relaciones de Escala entre el Transporte de Sedimentos en Suspensión y Características Morfoclimáticas de Cuencas Colombianas, IV Congreso Colombiano de Geología, Medellín Julio 30 y 31 y 1 de Agosto de 2003.